



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ Z OPTOVLÁKNOVÝCH SENZORŮ

PROCESSING OF SIGNALS FROM FIBER OPTIC SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Sikora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Čučka

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Vojtěch Sikora

ID: 164779

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Zpracování signálů z optovláknových senzorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoretický rozbor problematiky se zaměřením na výstupní veličiny snímání vibrací. Student se zaměří především na možnosti filtrace zarušených signálů pomocí metod korelace, FFT atd. Výstupem práce bude aplikace/m.file s implementovanými filtry pro zpracování naměřeného signálu z více druhů senzorických systémů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] STEEL, W. H. Interferometry. 2nd ed., 1st paperback ed. New York: Cambridge University Press, 1983. ISBN 0521311624.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Milan Čučka

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

První kapitoly práce se zabývají rozdělením optických vláknových senzorů, digitálním zpracováním signálu a je v nich zakomponováno cenové srovnání experimentálních senzorů. Třetí kapitola se zabývá rozbořem, popisem a hodnocením měření vibrací pomocí Machova - Zehnderova interferometru. V kapitole poslední je popsána aplikace pro analýzu signálu z vibračních senzorů. Popis obsahuje vysvětlené úryvky ze zdrojového kódu a grafické uživatelské rozhraní. Tato práce díky spojení oborů vláknové optiky, digitálního zpracování signálů a tvorby aplikace vytváří pevný základ pro studium optických vláknových senzorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optický vláknový senzor, Vibrační senzor, Distribuovaný vláknový senzor, Michelsonův interferometr, Machův - Zehnderův interferometr, OTDR, Zpracování signálu, Analýza signálu

ABSTRACT

First two chapters of this paper deals with the division of optical fiber sensors, digital signal processing and includes price comparison of four experimental sensors. In chapter three analysis, description and evaluation of measurment has been demonstrated on Mach - Zehnder interferometer. Last chapter is about application for signal analysis from vibration sensors. Description contains snippets from source code and graphical user interface. This paper includes three fields - fiber optics, digital signal processing and creation of application - and thanks to them it provides solid basis for study of optic fiber sensors.

KEYWORDS

Optic fiber sensor, Vibration sensor, Distributed fiber optic sensor, Michelson interferometer, Mach - Zehnder interferometer, OTDR, Signal processing, Signal analysis

SIKORA, Vojtěch. *Zpracování signálů z optovláknových senzorů*. Brno, 2018, 59 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Milan Čučka,

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Zpracování signálů z optovláknových senzorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Čučkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod	12
1 Optické vláknové senzory	13
1.1 Rozdělení vláknových senzorů	13
1.2 Distribuované vláknové senzory	14
1.2.1 Senzory detekující změnu amplitudy	14
1.2.2 Senzory detekující změnu polarizace	14
1.2.3 Senzory detekující změnu fáze	14
1.2.4 Senzory založené na rozptylu světla	16
1.3 Cenové porovnání senzorů	19
1.3.1 Real - time distribuovaný vibrační senzor využívající fázovou OTDR	20
1.3.2 Optický vláknový senzor vibrací využívající chaotický laser . .	21
1.3.3 Distribuovaný optický vláknový senzor využívající kruhového zapojení Machova - Zehnderova interferometru	23
1.3.4 Distribuovaný optický vláknový senzor založený na spektrální analýze POTDR	24
1.3.5 Shrnutí a srovnání senzorů	26
2 Digitální zpracování signálu - DSP	28
2.1 Rozdělení DSP	28
2.2 Základy DSP	28
2.2.1 Lineární systémy	28
2.2.2 Konvoluce	28
2.2.3 Diskrétní Fourierova Transformace	29
2.2.4 Rychlá Fourierova Transformace	29
2.2.5 Digitální filtry	30
3 Měření vibrací pomocí Machova - Zehnderova interferometru	34
3.1 Blokové schéma	34
3.2 Rozbor měření	34
3.2.1 Měření frekvence 1 Hz	35
3.2.2 Měření frekvence 10 Hz	36
3.2.3 Měření frekvence 300 Hz	37
3.2.4 Měření frekvence 3000 Hz	37
3.3 Zhodnocení měření	38
3.4 Měření šumového pozadí	38

4	Aplikace pro analýzu signálů z vláknových senzorů	40
4.1	Aplikace pro analýzu signálu z vibračních senzorů	40
4.1.1	Základní režim	40
4.1.2	Režim s designem filtru	47
4.1.3	Režim redukce šumu	49
4.1.4	Legenda prvků a proměnných ve zdrojovém kódu	51
5	Závěr	54
	Literatura	55
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
	Seznam příloh	58
A	Obsah přiloženého CD	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Michelsonův vláknový interferometr	15
1.2	Machův - Zehnderův vláknový interferometr	15
1.3	Sagnacův interferometr	16
1.4	Princip OTDR	18
1.5	Interference zpětně odražených vln	19
1.6	Senzor snímání vibrací pomocí Φ - OTDR (Převzato z: [13])	20
1.7	Experimentální zapojení senzoru s chaotickým laserem (Převzato z: [14])	22
1.8	Schéma zapojení senzoru s kruhovým MZI (Převzato z: [12])	23
1.9	Blokové schéma POTDR (Převzato z: [8])	25
2.1	Základní frekvenční charakteristiky digitálních filtrů	31
2.2	Skoková charakteristika digitálního filtru	32
2.3	Impulsní charakteristika digitálního filtru	33
3.1	Blokové schéma měření vibrací pomocí Machova - Zehnderova interferometru	34
3.2	Školní přípravek s interferometrem	35
3.3	Reproduktor s připevněným optickým kabelem	35
3.4	Funkční generátor signálu	36
3.5	Graf: Měření frekvence 1 Hz	36
3.6	Graf: Měření frekvence 10 Hz	37
3.7	Graf: Měření frekvence 300 Hz	37
3.8	Graf: Měření frekvence 3000 Hz	38
4.1	Uživatelské prostředí aplikace - základní režim	41
4.2	Ukázka správného zadání parametrů	42
4.3	Ukázka chybové hlášky u špatně zadaných parametrů	42
4.4	Hledání špiček s koeficientem hledání 2	43
4.5	Hledání špiček s koeficientem hledání 4	43
4.6	Vybrání a zobrazení frekvence v grafu	45
4.7	Uživatelské prostředí aplikace - režim s designem filtru	47
4.8	Uživatelské prostředí aplikace - režim redukce šumu	49
4.9	Srovnání signálu před a po redukcí šumu	50

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled komponent a jejich cena	21
1.2	Přehled komponent a jejich cena	22
1.3	Přehled komponent a jejich cena	24
1.4	Přehled komponent a jejich cena	25
1.5	Srovnání probraných senzorů	26
4.1	Legenda prvků ve zdrojovém kódu	52
4.2	Legenda proměnných ve výpisech zdrojového kódu	53

SEZNAM VÝPISŮ

4.1	Nahrání souboru *.csv	41
4.2	Nastavení popupmenu1	41
4.3	Ukázka ošetření vstupu edit1	42
4.4	Implementace různých druhů grafů	44
4.5	Hledání a vykreslování špiček	45
4.6	Získání informací o náměru	46
4.7	Výpočty v designu filtru	48
4.8	Aplikace filtru a následné vykreslení grafu	48

ÚVOD

Optické technologie se od svých počátků v 60. letech těší velké oblíbenosti na poli vědeckého výzkumu. Již v této době byli akademici přesvědčeni, že unikátní vlastnosti světla procházejícího optickým prostředím mají i mnoho dalších uplatnění. Jedním z nich bylo využití samotného optického vlákna jako čidla senzoru. Po přelomu, který nastal v roce 1970, když tým kolem Roberta D. Maurera a Donalda Kecka vytvořil vlákno s útlumem menším než 20 dB/km, už nebyl vývoj ničím limitován. Optické senzory se začaly uplatňovat v množství oborů, ve kterých byla výhodně využita elektromagnetická a elektrostatická odolnost, spolu s možností měření na velké vzdálenosti s malým útlumem signálu. Mezi tyto obory patří zejména doprava a stavebnictví obecně, elektrotechnika a medicína. S postupným a neupadajícím vývojem v těchto oborech byly stupňovány i požadavky na stále kvalitnější a přesnější senzory. Díky relativnímu mládí technologie a neutuchající pozornosti výzkumníků, je možné tyto požadavky s uspokojením plnit a posunovat je neustále dál. Příkladem je vývoj od bodových senzorů k plně distribuovaným sensorům, tedy měření po celé délce optického vlákna. Distribuované optické senzory jsou nyní schopny detekovat měřenou veličinu na vláknech dlouhých řádově kilometry s prostorovým rozlišením jednoho metru i méně. Tento výdobytek je již implementován u výškových staveb, dálnic, nebo třeba u vinutí transformátoru. V budoucnu s technologiemi jako jsou vysokorychlostní železnice, Hyperloop, či detekce seismické aktivity nebude o další využití nouze. Nejdůležitější faktor, který se zaslouhuje o velkou popularitu optických senzorů je již zmíněná odolnost vůči elektromagnetickému a elektrostatickému rušení, které se v dnešní době vyskytuje prakticky všude. Toto rušení brání ostatním měřicím přístrojům ve velmi přesném měření, což je čím dál tím častěji vyžadováno. Obrovským přínosem přispělo digitální zpracování signálu, které neustále ve společném vývoji posouvá řád přesnosti dál. S patřičným programovým vybavením velmi precizně vyrobených přístrojů a přenášejících signály, které jsou detailně zpracovávány, vytváříme pevný základ pro studenty a odborníky, kteří svými poznatky budou pokračovat v dalším výzkumu a tím podněcovat financování a atraktivitu optických vláknových senzorů.

1 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

Od šedesátých let 20. století postupně sledujeme dynamický vývoj nízkoútlumových optických vláken a optických součástí. Tento vývoj se projevil zejména v telekomunikacích, kde optická vlákna nahrazují dnes již brzy zastaralé metalické kabely. Další výzkum a výroba optických vláken znamenaly získání důležitých znalostí pro sestrojení optovláknových senzorů. Po sestrojení prvního optovláknového senzoru došlo k jejich velmi rychlému rozšíření a tento obor dnes nabízí nepřeborné množství různých typů použitelných v různých prostředích a pro různé aplikace. [4] Optické vláknové senzory jsou zejména vyjíměčné svými vlastnostmi mezi které patří:

- vysoká citlivost na měřený parametr,
- vysoký izolační odpor,
- jiskrová bezpečnost,
- odolnost proti prostředí,
- odolnost vůči elektromagnetickému záření,
- současné odebírání až několika tisíc naměřených hodnot.[5]

1.1 Rozdělení vláknových senzorů

V této části bude předvedeno rozdělení senzorů z hledisek přenosu, uspořádání a veličin, které jsou vlákna schopna měřit.

Rozdělení podle využití optického vlákna

- Vláknem slouží k přenosu informace
- Vláknem slouží jako samotný detektor

Rozdělení podle prostorového uspořádání senzoru

- Bodové senzory
- Distribuované senzory (rozprostřené)
- Semi-distribuované senzory (polo-rozprostřené)

Rozdělení podle měřené fyzikální veličiny

- Tepelné senzory
- Senzory pro měření mechanického napětí
- Deformační senzory
- Tlakové senzory
- Senzory pro měření posuvu (mikroposuvu)
- Vibrační senzory
- Senzory pro měření el. proudu
- Chemické a biochemické senzory

- Senzory pro měření pH
a mnoho dalších [3]

Tato práce se bude zabírat výhradně distribuovanými senzory, využívajícími vlákno jako senzor. Zkoumanou fyzikální veličinou bude zejména vibrace.

1.2 Distribuované vláknové senzory

U mnoha dnešních staveb a prostředků jako jsou mosty, tunely, výškové budovy, přehrad, generátory, letadla a u dalších si musíme být jistí jejich momentálním stavem, chceme-li se vyvarovat jakýmkoli potenciálním bezpečnostním rizikům. Do nedávných let se bezpečnostní inženýři museli spoléhat na různé typy vnějších inspekcí. Avšak kupříkladu praskliny v betonových jádrech nebylo možné do využití distribuovaných vláknových senzorů prakticky zjistit. Od distribuovaného vláknového senzoru se očekává, že dokáže zjistit např. informace o vibraci, či teplotě po celé délce optického vlákna pomocí rozptylu světla. Tohoto lze docílit zabudováním i standardních telekomunikačních vláken do výše zmíněných budov atd., aby mohly detekovat a ohlašovat v reálném čase jejich vnitřní stav. [2]

Distribuované vláknové senzory se dále dají dělit dle způsobu ovlivnění procházejícího paprsku světla.

1.2.1 Senzory detekující změnu amplitudy

Amplitudové senzory jsou jedny z nejrozšířenějších. Do této skupiny patří zejména senzory využívající změnu tlumení, senzory využívající změnu přechodu a odrazu světla, senzory využívající porušení okrajových podmínek šíření světla a senzory využívající generaci záření.

1.2.2 Senzory detekující změnu polarizace

U těchto senzorů se výhodně využívají fyzikální jevy manipulující s polarizací signálu. Mezi tyto jevy patří: Faradayův magnetický jev, Kerrův jev a Fotoelastický jev.

1.2.3 Senzory detekující změnu fáze

Senzory v této skupině patří mezi nejcitlivější, jelikož detekují změnu fáze optického signálu, která bývá změněna délkou vlnovodu, indexem lomu, či průřezem optického vlákna. Změna fáze se poté dá detekovat interferometrickými metodami. Tyto interferometry se dají rozdělit do tří skupin:

Mezividové interferometry

Tato skupina je založena na interferenci různých vidů mezi sebou v multimódových vláknech.

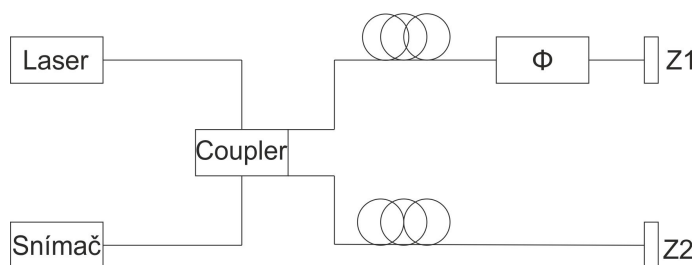
Jednovláknové interferometry

Do této skupiny patří například Sagnacův interferometr, porovnávající fázi dvou vln, šířících se proti sobě v cívce optického vlákna.

Dvojramenné interferometry

Nejznámějšími zástupci této skupiny jsou Michelsonův interferometr a Machův - Zehnderův interferometr, tato práce se bude z části zabývat právě těmito interferometry. [5]

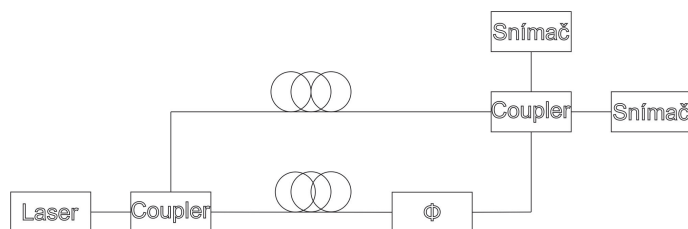
Michelsonův vláknový interferometr



Obr. 1.1: Michelsonův vláknový interferometr

Obecné schéma Michelsonova vláknového interferometru lze vidět na obrázku 1.1. Vysoce koherentní světelný paprsek generovaný laserem je v optickém 2×2 coupleru rozdělen do dvou rozdílných optických jednovláknových vláken. Jedno z vláken je vystaveno měřené veličině, která mění fázi procházejícího světla. Světlo je poté odraženo zpět pomocí zrcadel Z1 a Z2, po zpětném průchodu couplerem je snímačem analyzován interferenční obrazec.

Machův - Zehnderův vláknový interferometr

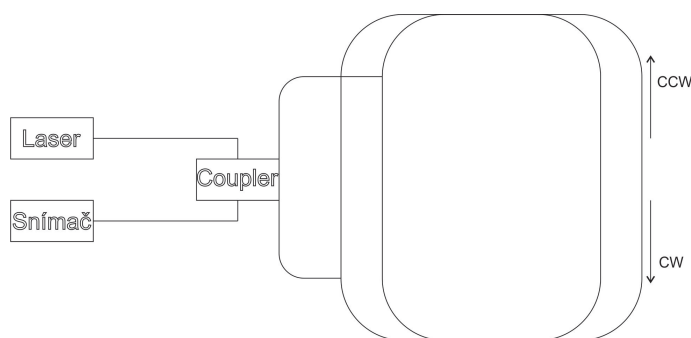


Obr. 1.2: Machův - Zehnderův vláknový interferometr

U Machova - Zehnderova interferometru je světelný paprsek podobně rozdělen do dvou optických vláken, ale narozdíl od Michelsonova interferometru nejsou tyto paprsky odraženy zpět, nýbrž jsou vedeny vlákny dál do druhého coupleru, kde spolu paprsky interferují a vytváří na snímačích interferenční obrazce. Podobně jako u Michelsonova interferometru, je jedno z vláken vystaveno měřené veličině měnící fázi procházejícího světla. [1]

Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr je založen na Sagnacově efektu, který je přímým důsledkem speciální teorie relativity. Efekt spočívá v rozdílných rychlostech šíření signálu po uzavřené dráze, běžících v opačných směrech v neinerciálních rotujících soustavách.



Obr. 1.3: Sagnacův interferometr

Základní schéma Sagnacova interferometru lze vidět na obrázku 1.3. Blokové schéma sestává z laseru, optického 2×2 coupleru, samotného optického vlákna navinutého do cívky a snímače.

Vstupní světelný paprsek je rozdělen couplerem na dvě stejné části. Ty jsou vloženy do cívky vytvořené z optického vlákna po směru (CW) a proti směru (CCW) hodinových ručiček. Spektrum interferovaného signálu poté vyhodnocuje snímač. [15]

1.2.4 Senzory založené na rozptylu světla

Tyto senzory jsou založeny na principu optického reflektometru, ve kterém je do vlákna vyslán světelný impuls a vlivem rozptylu v optickém vlákne se část impulsu vrací zpět ke zdroji a tím tedy i na detektor senzoru.

Rozptyl světla

Světelný paprsek postupující optickým vláknem na sebe vzájemně působí s atomy a molekulami složek ve struktuře vlákna. Touto interakcí vznikají dipóly generující

sekundární elektromagnetické vlny. Tento jev se nazývá rozptyl světla.

Ramanův a Rayleighův rozptyl

Převážná část rozptýleného záření má stejnou vlnovou délku jako záření původní - tento rozptyl se nazývá Rayleighův. Ale u malé části tohoto rozptýleného záření dochází ke změně vlnové délky oproti původnímu - tomuto rozptylu říkáme Ramanův. Teoreticky se těmito jevy zabývali vědci již od roku 1923 a v roce 1928 byly experimentálně prokázány.

K rozptylu zpravidla dojde v okamžiku, kdy se foton vstupujícího záření srazí s molekulou ve struktuře vlákna. Ke srážce dojde přibližně u jedné tisícině původního zářivého toku. Při pružné srážce se energie fotonu ani molekuly nemění, v tom případě se nemění ani vlnová délka u vzniklého rozptýleného záření a nazýváme jej Rayleighův rozptyl. Při této srážce dojde k posunu molekuly na vyšší energetickou hladinu, avšak téměř okamžitě se vrací na hladinu původní, čímž nedojde k pohlcení, ani emisi energie a rozptýlenému fotonu zůstává stejná energie. U řádově mnohem menší části původního záření dojde k nepružným srážkám, kde foton odevzdá molekule část své energie, či od molekuly jisté kvantum energie přijme. Se změnou energie fotonu se tedy změní i jeho frekvence. Výsledné rozptýlené vlnění tedy má rozdílnou vlnovou délku a nazýváme jej Ramanův rozptyl. U těchto srážek se nemění kinetická energie, ale pouze vnitřní energie molekul, důsledkem tedy je její přechod z nižšího do vyššího stavu, či naopak. Rozdíl frekvence fotonu před a po srážce se nazývá Ramanův posun.[7]

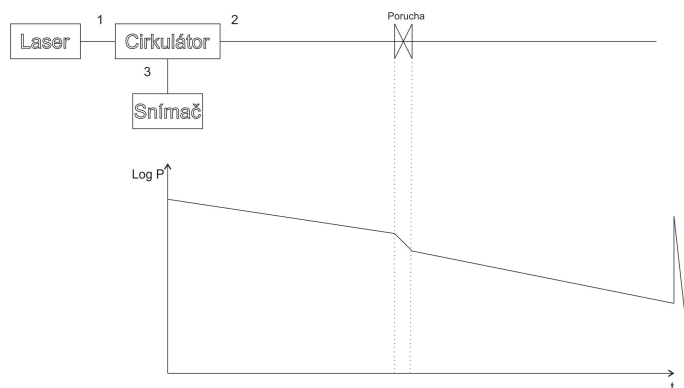
Brillouinův rozptyl

Tento jev v nelineárním optickém prostředí souvisí s šířením akustické vlny po optickém vlákně. Akustická vlna s dostatečným výkonem způsobí lokální změnu indexu lomu a v tomto místě poté dochází k oddělení fotonu od šířícího se signálu. Takto rozptýlená vlna postupuje v opačném směru než vlna původní je frekvenčně posunutá níže. [16]

OTDR - Optical Time Domain Reflectometry

Distribuovaný senzor postavený na základě OTDR detekuje světlo rozptýlené pomocí Rayleighovu rozptylu jako funkci času. Velkou výhodou OTDR je, že k detekci a vyhodnocení zpětně odražených vln je potřeba mít přístup pouze k jednomu konci měřeného optického vlákna. Amplituda těchto vln poté odpovídá času respektive vzdálenosti, ve které se vlna v optickém vlákně odrazila. Díky pulsnímu vstupnímu optickému signálu a následnému sledování změn v intenzitě rozptýleného světla získáme informace o útlumu, průřezu, či prostorových rozptylových koeficientech.

V dnešní době se tato technologie OTDR využívá k zaměřování chyb a nedokonalostí na optické trase.



Obr. 1.4: Princip OTDR

Na obrázku 1.4 vidíme jednoduché schéma analýzy. Laser vyšle krátký impuls do testovacího vlákna a snímač následně zachytí a analyzuje rozptýlený signál. Pokud je optické vlákno po celé své délce homogenní, intenzita odraženého světla klesá exponenciálně s časem, díky útlumu vlákna.

Prostorové rozlišení OTDR je nejmenší pozorovatelná vzdálenost mezi dvěma rozptyly, je dána šířkou vstupního impulsu. Toto lze vidět v rovnici 1.1, kde c je rychlost světla, τ je šířka impulsu a n je skupinový index jádra optického vlákna.

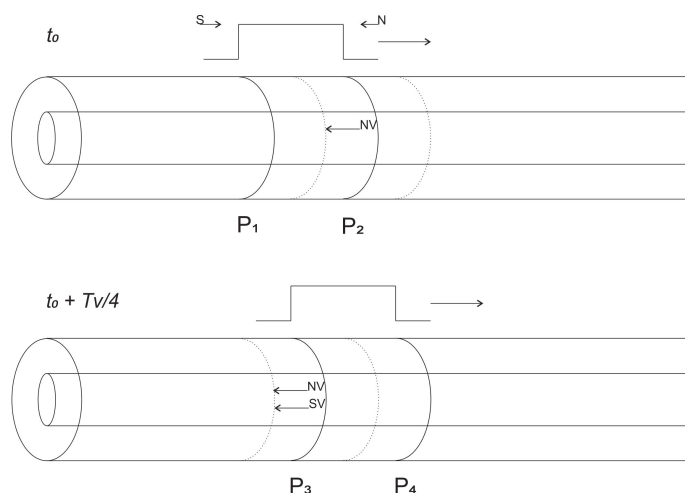
$$\Delta z_{min} = \frac{c\tau}{2n} \quad (1.1)$$

Φ - OTDR - Fázová OTDR

Tato forma OTDR se využívá zejména na měření porušení trasy, vibrací, nebo tlaku na vysoké vzdálenosti. Stejně jako OTDR využívá Rayleighův rozptyl, avšak místo měření změny útlumu měří fázový rozdíl, díky kterému je zařízení vysoce citlivé. Je potřeba využít vysoce koherentní světlo s úzkou spektrální čarou, poté je možné sledovat časové obrazy. Změny v těchto obrazech můžou být změny v indexu lomu způsobené měřenou veličinou. Detekce tedy spočívá v porovnávání po sobě jdoucích impulsů a lokalizace je možná díky délce časového opoždění.

Na obrázku 1.5 lze vidět princip interference zpětně odražených vln. V čase t_0 je vlna NV zpětně odražená od náběžné hrany v bodě P_2 . V čase $t_0 + Tv/4$, (kde T je šířka pulsu a v je skupinová rychlost šíření světelné vlny) tato vlna urazí vzdálenost rovnající se polovině šířky pulsu a druhá vlna SV je odražena od sestupné hrany pulsu. Tyto dvě světelné vlny spolu poté interferují. Fázový posun se poté dá vypočítat jako:

$$\Phi = \frac{4\pi n}{\lambda} L, \quad (1.2)$$



Obr. 1.5: Interference zpětně odražených vln

kde n je index lomu vlákna, λ je vlnová délka a L je délka dutiny. [6]

POTDR - Polarization Time Domain Reflectometry

Optická reflektometrie založena na měření změny polarizace zpětně odražených optických vln v optickém prostředí disponuje o mnoho lepší citlivostí než kterou nabízí klasická OTDR, zkoumající pouze intenzitu odraženého světla. U této metody je důležité využití úzkospektrálního DFB laseru, u kterého je uvažováno, že polarizace šířícího se světla po jednovidovém vlákně se zásadně nemění. Vlivem snímané veličiny na optické vlákno se mění jeho polarizační vlastnosti, tím pádem se mění i polarizace zpětně rozptýlených vln. Důležitými prvky využitými v systému POTDR jsou zejména vstupní polarizátor, přesně definující polarizaci vstupního světelného paprsku. Na přijímací straně je poté využit dvojlomový analyzátor, rozkládající příchozí optický signál na dva navzájem ortogonální signály, které jsou samostatně zpracovány v přijímači, kde se poté porovnávají s původním měřícím signálem. [5]

1.3 Cenové porovnání senzorů

V této části se práce věnuje cenovým porovnáním vibračních senzorů založených na různých technologiích, průzkumem jejich implementace, využití a možností jejich praktického sestrojení v laboratořích VUT FEKT.

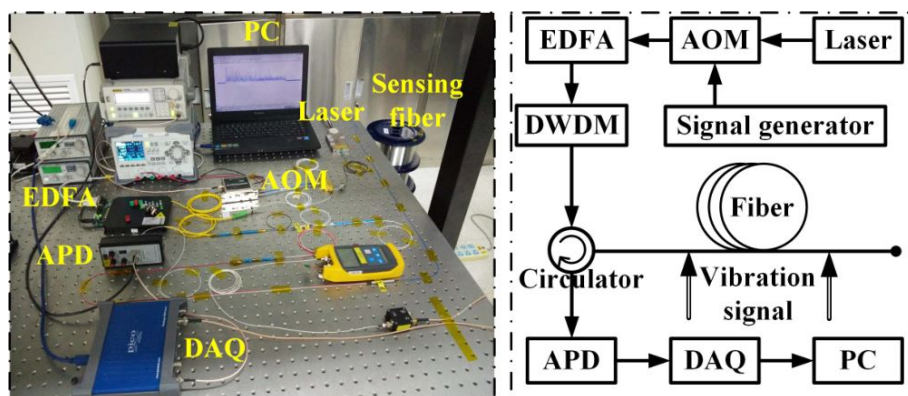
Ceny uvedené u jednotlivých senzorů neodpovídají celkovým cenám sestav. Pro zjednodušení jsou započítány pouze součástky, které nejsou ve všech zapojeních stejné, podobné, či svou cenou nepodstatné¹. Ceny součástek, které nebyly ve zdro-

¹Jako cenově nepodstatné byly brány součástky s nižší cenou než 200 USD.

jových textech přímo specifikovány, byly určeny průměrováním cen součástek podobných.²

1.3.1 Real - time distribuovaný vibrační senzor využívající fázovou OTDR

Tento senzor snímající vibrace byl vytvořen a experimentálně otestován v Taiyuan University of Technology v Číně v roce 2016. Systém byl navrhován k postupnému řešení 1-D, 2-D a 3-D snímání vibrací. V této práci se budeme zabývat pouze návrhem 1-D detekce.



Obr. 1.6: Senzor snímání vibrací pomocí Φ - OTDR (Převzato z: [13])

Na obrázku 1.6, lze vidět reálné laboratorní zapojení a blokové schéma senzoru.

V zapojení je využit laser RIO ORION™ se spektrální šířkou 2,2 kHz, výstupním výkonem 18,74 mW pracující na vlnové délce 1550 nm. Tento laser má velmi nízký frekvenční posun (méně než 1 MHz/min), což je velmi důležité pro dosažení dostatečné interferenční stability.

Světelná vlna je modulována pomocí akusticko-optického modulátoru (AOM) s maximálním vložným útlumem 6 dB, pomocí generátoru signálu se generují pulsy s frekvencí 8 kHz a odstupem 200 ns.

Pulsující světelný paprsek je zesílen pomocí zesilovače EDFA a filtrován pomocí vlnového multiplexu DWDM za účelem eliminace spontánní emise ze zesilovače. Upravený světelný paprsek je poté vložen do optického vlákna pomocí optického cirkulátoru, kde se po délce vlákna generují zpětné vlny Rayleighova rozptylu.

Tyto vlny jsou zesíleny a poté snímány vysoce citlivým fotodetektorem (lavinovou fotodiodou s šířkou pásma 10 MHz). Světelné vlny jsou nakonec vzorkovány pomocí DAQ se vzorkovací frekvencí 200 MS/s, analyzovány a zobrazovány na osciloskopu.

²Převod cen byl vypočítán pomocí středního kurzu ČNB dne 26.10.2017 (1 USD = 21,73 CZK).

V tabulce 1.1 lze vidět ceny použitých součástek, díky využití vysoce koherentního laseru, velmi citlivého fotodetektoru a výkonného optického zesilovače dokázal tým z univerzity v Taiyuan sestavit senzor pracující s přesností 10 m na celkovou délku vlákna 6054 m. Tomu ovšem odpovídá i cena, která vylučuje sestavení tohoto senzoru, pro tuto diplomovou práci. [13]

Tab. 1.1: Přehled komponent a jejich cena

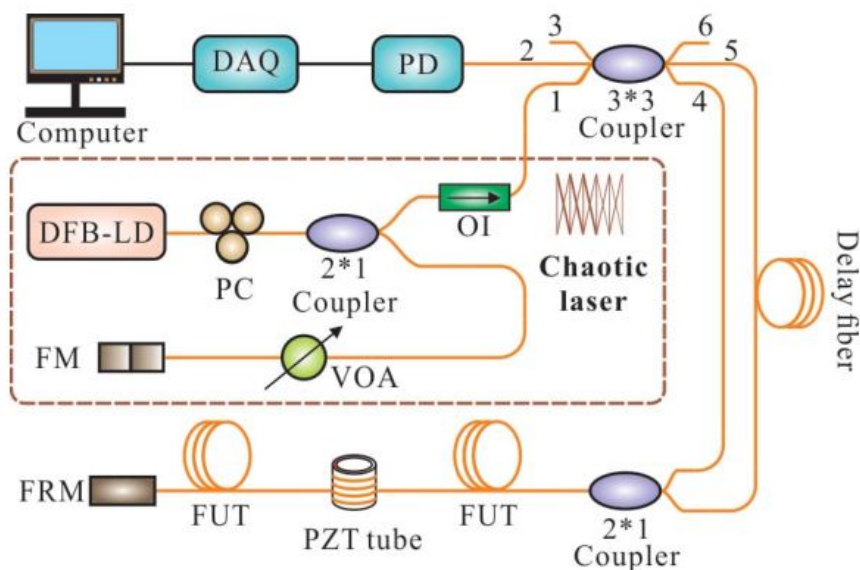
Komponenta	Cena v USD	Cena v CZK
Laser	2000	43460
AOM	900	19557
EDFA	800	17384
APD	1400	30422
Celkem	5100	110823

1.3.2 Optický vláknový senzor vibrací využívající chaotický laser

Senzor vyvinutý a testovaný opět na Taiyuan University of Technology v Číně byl vytvořen podobným týmem jako snímač v kapitole 1.3.1. Tento senzor je konstruovaný na základě kombinace chaotického laseru a nevybalancované struktury Sagnacova a Machova - Zehnderova interferometru. Použitím chaotického laseru s nízkou koherencí a dostatečnou šířkou pásma je senzor schopen získat frekvenční spektrum vložených vibrací.

Experimentální zapojení senzoru lze vidět na obrázku 1.7. DFB laserová dioda pracuje s vlnovou délkou 1549,7 nm a produkuje potřebný chaotický světelný svazek. Optický coupler tento svazek poté rozdělí v poměru 1:1, jeden svazek je využit jako výstupní a druhý je využit jako optická zpětná vazba. Úroveň zpětné vazby odražené od vláknového zrcadla (FM) lze upravovat pomocí nastavitelného optického zesilovače (VOA). Důvodem k použití kontroléru polarizace (PC) je kontrola a úprava polarizace odraženého světla ve zpětné vazbě. Posledním prvkem v části emitující světelný svazek je optický izolátor (OI), který předchází nechtěné zpětné vazbě narušující práci emitoru světelného svazku.

Svazek vystupující z emitoru je veden do 3×3 coupleru a poté přes 2×1 coupler do testovaného vlákna s délkou 12101 m, na jehož konci se nachází Faradayovo rotační zrcadlo (FRM). 0,6 m optického vlákna je vystaveno vibracím, v tomto



Obr. 1.7: Experimentální zapojení senzoru s chaotickým laserem (Převzato z: [14])

případě piezoelektrickým keramickým převodníkem (PZT), pomocí kterého lze měnit frekvenci i amplitudu vibrací. Díky vibracím se změní fáze procházejícího světla, které zaznamená fotodetektor a vyšle signály k analýze do počítače.

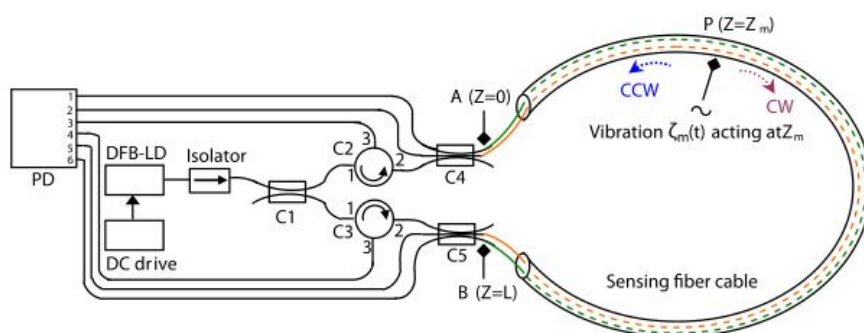
Z tabulky 1.2 lze zjistit, že tento vláknový senzor je cenově mnohem přijatelnější, než senzor v kapitole 1.3.1. Experimentálně bylo zjištěno, že s touto strukturou je možné dosáhnout přesnosti 22 m na délku vlákna 12101 m. Z toho lze usoudit, že senzor je přibližně stejně přesný vztáhneme-li přesnost k efektivnímu měření na určité délce vlákna. Interferometrická struktura ale u tohoto senzoru vyžaduje, aby na konci měřeného vlákna bylo v tomto případě Faradayovo rotační zrcadlo, na rozdíl od ϕ - OTDR, kde se pracuje s volným koncem optického vlákna.

Tab. 1.2: Přehled komponent a jejich cena

Komponenta	Cena v USD	Cena v CZK
DFB - LD	300	6519
3 × Coupler	600	13038
VOA	400	8692
FRM	500	10865
Celkem	1800	39114

1.3.3 Distribuovaný optický vláknový senzor využívající kruhového zapojení Machova - Zehnderova interferometru

Senzor vytvořený na Huazhong University of Science and Technology, Hubei, China, je díky své dvojité kruhové struktuře velmi spolehlivý, je schopen detekovat vibrace a na rozdíl od jednoduchého MZI je i lokalizovat. Schéma tohoto zapojení lze vidět na obrázku 1.8. Senzor sestává z jednoho 2×2 coupleru (C1), dvou optických cirkulátorů (C2, C3), dvou 3×3 couplerů (C4, C5) a optického vlákna s dvěma jádry. Jako světelný zdroj slouží vysoce koherentní a stabilní DFB laserová dioda, napájená stejnosměrným napětím (DC drive). Optické vlákno s dvěma jádry bylo zvoleno z důvodu zmenšení rozdílu mezi oběma optickými trasami v ramenech MZI. Jako detektor slouží pole o šesti synchronně pracujících fotodetektorech (PD).



Obr. 1.8: Schéma zapojení senzoru s kruhovým MZI (Převzato z: [12])

Kontinuální vlna emitovaná laserovou diodou je rozdělena do dvou optických cest pomocí coupleru C1. První svazek pomocí cirkulátoru C2 vstupuje na další optický coupler C4, který opět dělí svazek na polovinu a vkládá je do dvojice optických vláken, po kterých vlna postupuje po směru hodinových ručiček (CW). Poté interferují v coupleru C5. Podobně druhá optická cesta začínající z coupleru C1 pokračuje cirkulátorem C3, do coupleru C5, kde jsou svazky rozděleny do dvou vláken, postupují proti směru hodinových ručiček (CCW) a interferují v coupleru C4. Tím pádem jedním kruhovým MZI v tomto případě pracuje jako dvojitý, díky dvěma proti sobě postupujícím světelným svazkům. První postupuje cestou LD-C1-C2-C4-C5-C3-PD, kdežto druhá postupuje v pořadí LD-C1-C3-C5-C4-C2-PD. V jednoduchém MZI senzoru by bylo možné pouze vibraci detekovat, nikoli ji i lokalizovat. Díky kruhovému zapojení můžeme lokalizaci provést pomocí následujících vztahů.

Jak lze vidět na schématu 1.8 body A a B jsou vstupy do měřicího vlákna a bod P je místo zasažené vibracemi. Délka optického kabelu je zaznačena jako L . Vzdálenost z bodu A do bodu P je zaznačena jako Z_m . Zachytí-li senzor v bodě

P vibraci, oba interferometry zareagují stejným fázovým posunem zároveň. Poté tedy vzdálenost, kterou musí vlna CW s informací o vibraci urazit je:

$$L_{CW} = L - Z_m, \quad (1.3)$$

druhá vlna v opačném směru tím pádem urazí vzdálenost:

$$L_{CCW} = Z_m. \quad (1.4)$$

Z důvodu rozdílu vzdáleností mezi světelnými svazky prostupujícími bodem vibrací vzniká časové zpoždění definováno jako:

$$\Delta T = \frac{(L - 2 \cdot Z_m) \cdot n}{c}, \quad (1.5)$$

kde n je index lomu jádra optického vlákna a c je rychlost světla ve vakuu. Se změřenou veličinou ΔT již můžeme jednoduše definovat polohu vibrací s použitím vztahu:

$$Z_m = \frac{L - \Delta T \cdot \frac{c}{n}}{2}. \quad (1.6)$$

Přesnost tohoto senzoru je uvedena jako 38 m na délku vlákna 1010 m, což k celkové ceně vyplývající z tabulky 1.3, není nejefektivnější poměr. Ovšem relativně vysoká cena tohoto senzoru je dána použitím šesti PIN-FET detektorů, které je možno zaměnit za jiné efektivnější komponenty. Jelikož tento senzor byl konstruován v roce 2007, dnes již jsou tyto komponenty překonány. [12]

Tab. 1.3: Přehled komponent a jejich cena

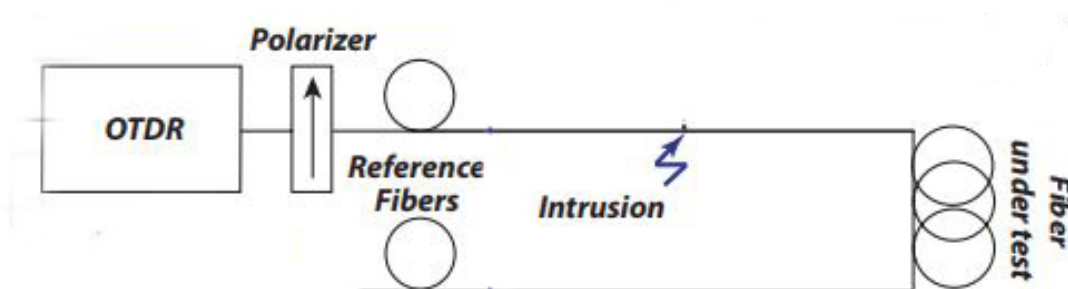
Komponenta	Cena v USD	Cena v CZK
DFB - LD	300	6519
3 × Coupler	600	13038
6 × PIN-FET detector	1800	39114
Celkem	2700	58671

1.3.4 Distribuovaný optický vláknový senzor založený na spektrální analýze POTDR

Tato konfigurace systému POTDR experimentálně testovaná na University of Mons v Belgii, se výrazně nijak neliší od komerčně využívaných OTDR systémů. Mezi OTDR a měřené vlákno se připojí polarizátor, polarizující světlo ideálně do roviny, ve které měřené vlákno vykazuje nejnížší úroveň signálu tvořenou Rayleighovým

rozptylem a tím zvýšit intenzitu signálu přenášenou vláknem. Při zpětném průchodu polarizátorem se náhodně polarizované světelné vlny transformují na výkyvy úrovně signálu, tvořící klasickou křivku na výstupu OTDR. Narušení vlákna vibracemi poté způsobí změny v polarizaci zpětně odražených světelných vln, systém OTDR pak vykazuje změny v úrovních signálu na určitém místě trasy.

Výběr světelného zdroje v OTDR je v tomto případě velmi důležitým krokem, aby se předcházelo depolarizaci světla již v samotném zdroji. Ideální šířka spektrální čáry spadá mezi klasický přístroj OTDR a C-OTDR (Koherentní - OTDR). [17] [8]



Obr. 1.9: Blokové schéma POTDR (Převzato z: [8])

Dle ceny v tabulce 1.4 lze při přesnosti 5 m na délku vlákna 472,5 m odvodit, že přístroj má nejhorší možný poměr ceny ku přesnosti, ale v tomto případě hraje roli vysoká cena C-OTDR, či OTDR přístroje, který je dostupný ve většině optických laboratořích. Naopak, při odečtení tohoto vysokého výdaje je tento senzor jeden z nejlevnějších a nejjednodušších, které lze sestavit.

Tab. 1.4: Přehled komponent a jejich cena

Komponenta	Cena v USD	Cena v CZK
C-OTDR	7000	152110
Polarizer	600	13038
Celkem	7600	165148

Tab. 1.5: Srovnání probraných senzorů

Senzor (Kapitola)	Rok	Cena v USD	Cena v CZK	Přesnost	Délka měřeného vlákna
1.3.1 ³	2017	5100	110823	10 m	6054 m
1.3.2 ⁴	2017	1800	39114	22 m	12101 m
1.3.3 ⁵	2008	2700	58671	38 m	1010 m
1.3.4 ⁶	2012	600	13038	5 m	472,5 m

1.3.5 Shrnutí a srovnání senzorů

V této části práce byly probrány čtyři experimentálně sestavené distribuované vláknové senzory. Dva založené na interferometrických metodách a dva založené na rozptylu světla. Jejich srovnání můžeme vidět v tabulce 1.5.

Zaměříme-li se na první dva senzory, sestavené v posledním roce (senzory z kapitol 1.3.1 ³ 1.3.2 ⁴), lze posoudit, že jejich poměr přesnosti k délce měřeného vlákna je zhruba podobný. Vidíme ale obrovský rozdíl v ceně. Ten vzniká z důvodu poměrné „čerstvosti“ technologie fázové OTDR, kde díky potřebě využití jak vysoce kvalitních emitorů a přijímačů světla se navazuje i nutnost použití nízkoútlumových a moderních součástí i ve zbytku zapojení. Naopak u interferometrické metody, v tomto případě kombinace Sagnacova a Machova - Zehnderova interferometru je cena třetinová, už jen z důvodů, že většina komponent je běžně dostupná ve většině optických laboratořích. U těchto dvou senzorů je ale nutné podotknout, že jejich sestavení je z výběru nejsložitější. Obě sestavení byly navrhovány na snímání co největší délky vláken, jelikož u obou se počítá s implementací na dlouhá vedení potrubí, jako jsou ropovody, plynovody atd. U těchto typů snímačů je plně dostačující přesnost v desítkách metrů, jelikož snímaná veličina je většinou únik kapaliny (plynu), či vnější narušení potrubí vetřelcem.

Tohoto problému se týkalo i sestavení senzoru z kapitoly 1.3.3 ⁵. U senzoru je ale viditelné jeho již brzy značné stáří. Přesnost 38 m na délku vlákna 1010 m při ceně 58671 CZK, je vzhledem k ostatním senzorům velmi zaostalá hodnota. Nicméně s přihlédnutím k vývoji optických komponent je vysoce pravděpodobné, že lze sestavit za značně nižší cenu přístroj se stejnou přesností, či naopak za stejnou cenu velmi přesný přístroj s možností měřit na vyšší vzdálenosti.

³Real - time distribuovaný vibrační senzor využívající fázovou OTDR

⁴Optický vláknový senzor vibrací využívající chaotický laser

⁵Distribuovaný optický vláknový senzor využívající kruhového zapojení Machova – Zehnderova interferometru

⁶Distribuovaný optický vláknový senzor založený na spektrální analýze POTDR

Poslední ze senzorů (1.3.4 ⁶) se více zabýval zabezpečením menších perimetrů, což dokazuje i malá délka měřeného vlákna 472,5 m, na které bylo dosaženo přesnosti 5 m. Tedy využití zejména v zabezpečení objektů. K pozastavení je zejména cena tohoto senzoru. Sestavení a testování senzoru v laboratorních podmínkách je nejlevnější ze zmíněných, počítáme-li cenu bez OTDR. Jelikož ceny tohoto přístroje šplhají až k 12000 USD, bylo by velmi ekonomicky nevýhodné využít tento senzor v reálném zabezpečovacím systému.

2 DIGITÁLNÍ ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU - DSP

Digitální zpracování signálu je technologie formující mnohá odvětví vědy a techniky 21. století. Přineslo mnohé revoluční změny například do oborů telekomunikací, medicíny, audio inženýrství a do mnohých dalších. Každý z oborů se v oblasti DSP svým výzkumem dostal k vlastním technikám a algoritmům, což se spojením s širokým záběrem oblastí tvoří obrovský celek. Pro jednotlivce je doporučeno se začít věnovat základům DSP a poté v oblasti zájmu přejít do hloubky ve svém oboru.

2.1 Rozdělení DSP

Základy DSP byly založeny v 60. a 70. letech 20. století, když začaly být k dispozici první počítače. Prvními obory, které se zajímaly o zpracování signálů byly velké firmy, armáda, lékařství a kosmické agentury. Tedy instituce schopny vlastnit drahé počítače. Dnes se mimo tyto obory zajímá o digitální zpracování signálu i telekomunikace, průmysl a vědní obory obecně.

2.2 Základy DSP

V této sekci budou probrány základy digitálního zpracování signálů. Větší pozornost je upřena zejména na Diskrétní Fourierovu Transformaci (DFT), Rychlou Fourierovu Transformaci (FFT) a na digitální filtry, využitě dále v práci.

2.2.1 Lineární systémy

Většina technik DSP je založena na superpozici. To znamená, že systém je rozložen na dílčí části, každá z částí provede svou operaci a výsledky se opětovně sečtou. Tato technika rozložení jednoho složitého systému na dílčí jednoduché je možná pouze u lineárních systémů. Systémem nazýváme jakýkoli proces, který generuje výstupní signál v závislosti na signálu vstupním.

2.2.2 Konvoluce

Konvoluce je matematická operace kombinující dva signály a tím vytvářející signál třetí. Je to velmi jednoduchá a zároveň nejdůležitější technika v DSP. Konvoluce je důležitá při zjišťování např. impulsní odezvy, jelikož popisuje všechny tři signály v impulsní odezvě figurující.

2.2.3 Diskrétní Fourierova Transformace

Transformace se využívá pro převod signálu z časové do frekvenční oblasti, využívající při tom funkce sinus a kosinus.

Signály mohou být jak diskrétní, nebo spojité, tak i periodické, nebo neperiodické. Kombinace těchto dvou možností tvoří čtyři kategorie, ke každé se váže jeden druh transformace.

- Neperiodický, spojitý signál - Fourierova Transformace
- Periodický, spojitý signál - Fourierovy řady
- Neperiodický, diskrétní signál - Diskrétní Časová Fourierova Transformace
- Periodický, diskrétní signál - Diskrétní Fourierova Transformace

Jelikož u neperiodických signálů bylo zjištěno, že počet sinusoid potřebných k výpočtu transformace je nekonečný, je algoritmicky nemožné vypočítat Diskrétní Časovou Fourierovu Transformaci procesorem počítače. Proto pro potřeby DSP je možná jediná transformace a to Diskrétní Fourierova.

2.2.4 Rychlá Fourierova Transformace

Rychlá Fourierova Transformace je jednou z možností jak vypočítat Diskrétní Fourierovu Transformaci. Stejně jako u mnoha dalších metod je výstup totožný. U FFT si ale všímáme nesmírně efektivního výpočtu, který je řádově nižší v počtu operací. FFT je založena na komplexní DFT, sofistikovanější verzi DFT.

V komplexní notaci časová a frekvenční oblast každá obsahuje jeden signál, tvořený N komplexními body. Každý z těchto bodů je tvořen svou reálnou a imaginární částí. FFT dekomponuje N bodový signál v časové oblasti na N signálů v časové oblasti, každý tvořen jedním bodem. Dalším krokem je výpočet N frekvenčních spekter korespondujících s N signály v časové oblasti. Nakonec je N spekter spojeno do jednoho frekvenčního spektra.

Dekompozice

V předešlé části je zmíněna operace „dekompozice“. Tato operace rozděluje postupně N prvkový signál na poloviny, dokud nezbyde N signálu s jedním prvkem. Kupříkladu pokud by se rozděloval signál s šestnácti prvky je postup 16-8-4-2-1. Zjednodušení celé dekompozice je fakt, že pořadí prvků v původním a dekomponovaném signálu je pořadí po bitové reverzi. To znamená že 1. prvek (0001) je nyní prvek 8. (1000), nebo prvek 13. (1101) je nyní prvek 11. (1011) a tak dále. Dekompozice není tedy nic víc než přeskládání prvků v signálu.

2.2.5 Digitální filtry

Pro pochopení teorie filtrů je potřeba znát základní jednotku, kterou je decibel [dB]. 1 bel znamená, že výkon byl zvýšen $10\times$. Analogicky, pokud elektronický obvod má zesílení 3 bely, na jeho výstupu je signál $10 \times 10 \times 10 = 1000\times$ zesílený, než na jeho vstupu. Decibel je tedy jedna desetina belu. Hodnoty -20 dB, -10 dB, 0 dB, 10 dB, 20 dB znamenají zesílení 0,01; 0,1; 1; 10; 100. To zjednodušeně znamená, že za každých 10 dB, se zesílení zvýší $10\times$. Obvykle ale chceme pracovat s amplitudou signálu, ne s jeho výkonem. Představme si tedy zesilovač se zesílením 20 dB. Z definice byl výkon signálu zvýšen $100\times$. Jelikož je amplituda druhou odmocninou výkonu, amplituda signálu se zvýšila $10\times$ oproti amplitudě na vstupu. V tomto případě každých 20 dB znamená změnu amplitudy $10\times$. Změnu výkonu popisuje rovnice 2.1, změnu amplitudy rovnice 2.2.

$$[dB] = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.1)$$

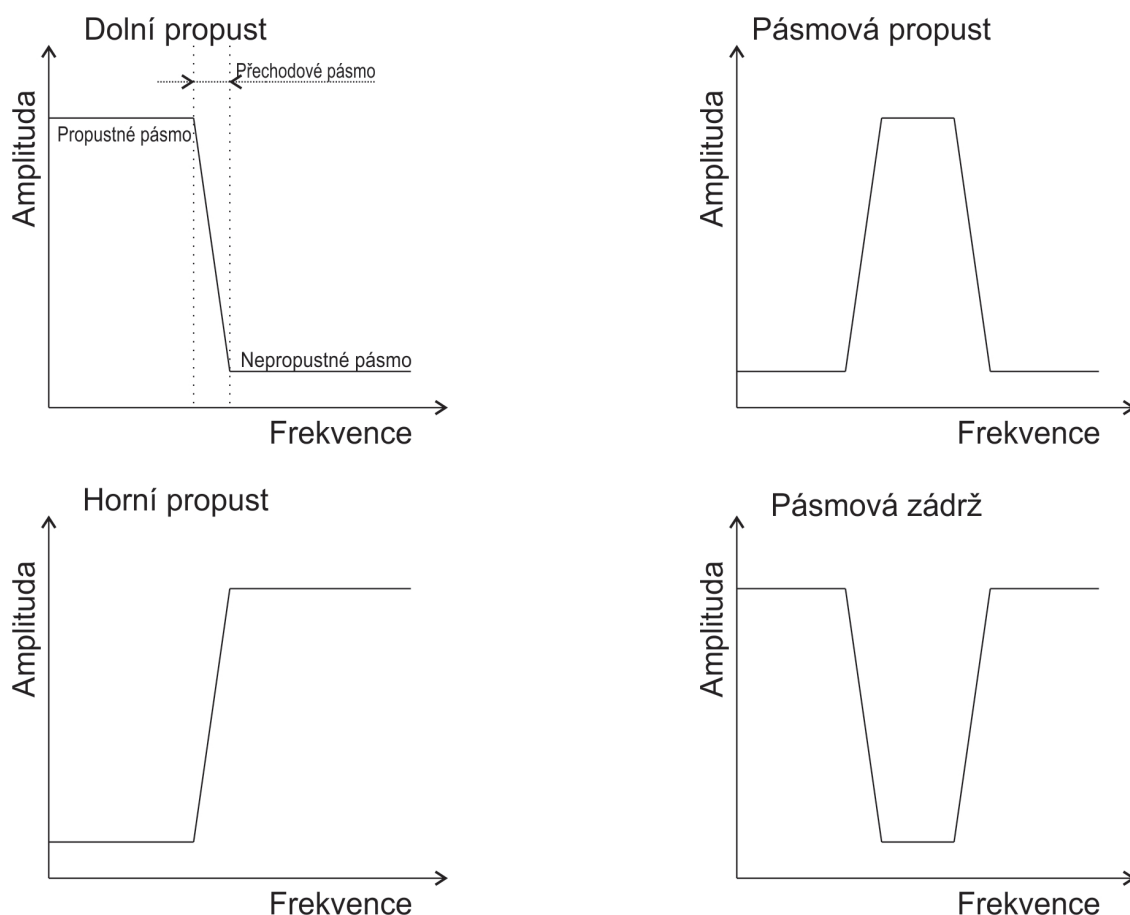
$$[dB] = 20 \log_{10} \frac{A_2}{A_1}, \quad (2.2)$$

I když se decibely využívají k poměrování dvou signálů, je tato jednotka také ideální k popisu zisku systému. Tedy k popisu amplitudy, či výkonu samotného signálu, vztaženou k referenční hodnotě. Mezi tyto jednotky patří dBV, tedy porovnání signálu k 1 V RMS, podobně jednotka dBm, která vztahuje výkon signálu k 1 mW.

Digitální filtry jsou používány zejména ze dvou důvodů. Prvním je separování signálů, které byly postižené šumem, či jiným druhem rušení. Druhým je obnovování signálů, používané třeba v audio technice, nebo ve zkvalitňování obrazů. Digitální filtry dosahují mnohem lepších výsledků než filtry analogové, které dosahují v některých aplikacích svých limitů.

Každý digitální lineární filtr určuje impulzní odezva (obrázek 2.3), skoková odezva (obrázek 2.2) a frekvenční charakteristika (obrázek 2.1). Každá z charakteristik obsahuje kompletní informace o filtru, ale v jiné formě. Pokud je jedna z charakteristik naměřena, ostatní dvě mohou být dopočítány. Nicméně všechny tři charakteristiky jsou důležité, jelikož popisují jak filtr reaguje za různých podmínek.

Nejpřímejší cestou k implementaci digitálního filtru je konvoluce vstupního signálu s impulzní odezvou filtru. Další možností jak vytvořit digitální filtr je rekurze. Rekurní filtry využívají nejen prvky ze vstupu, ale i prvky dříve vypočítané. Impulzní odezvy rekurzivních filtrů jsou nekonečné. Tyto filtry nazýváme IIR, neboli filtry s nekonečnou impulzní odezvou. Filtry s konečnou impulzní odezvou nazýváme FIR. [10] [11]



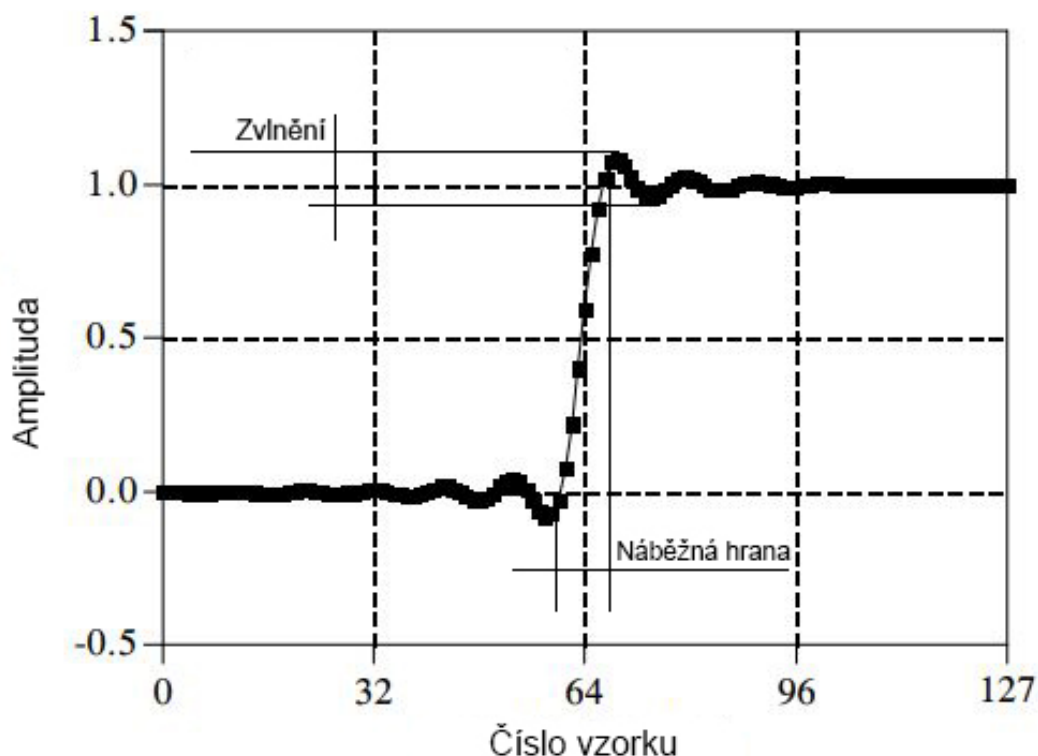
Obr. 2.1: Základní frekvenční charakteristiky digitálních filtrů

Designování digitálních filtrů

Prvním krokem před samotným vytvářením filtru je pochopení samotného signálu, který bude dále analyzován a filtrován. Zejména je potřeba vědět zda je informace obsažena v časové, či frekvenční oblasti signálu. Ve frekvenční oblasti jsou nositelem informace spektrální charakteristiky, kdežto v oblasti časové to jsou amplituda a fáze signálu. Druhý krok rozhoduje o typu filtru, který budeme dále implementovat. Tyto typy filtrů (FIR a IIR) byly popsány v předchozích kapitolách. Výhodou ve výběru FIR filtru je nezkreslení fáze a pokud budeme implementovat filtr vysokého řádu, dostaneme ve výsledku i velmi kvalitní filtr. Nevýhodou jsou vyšší nároky na výkon. S nižšími nároky se váže implementace IIR filtrů, to z nich tvoří ideálnější kandidáty na implementaci i přes řadu nevýhod. Mezi tyto nevýhody se řadí nelineární fázová odezva a jsou také výkonově limitovány z aritmetických důvodů.

Dalším krokem je vyhodnocování charakteristik filtru oproti navrhované implementaci.

Skoková charakteristika je k vidění na obrázku 2.2. Tato charakteristika je

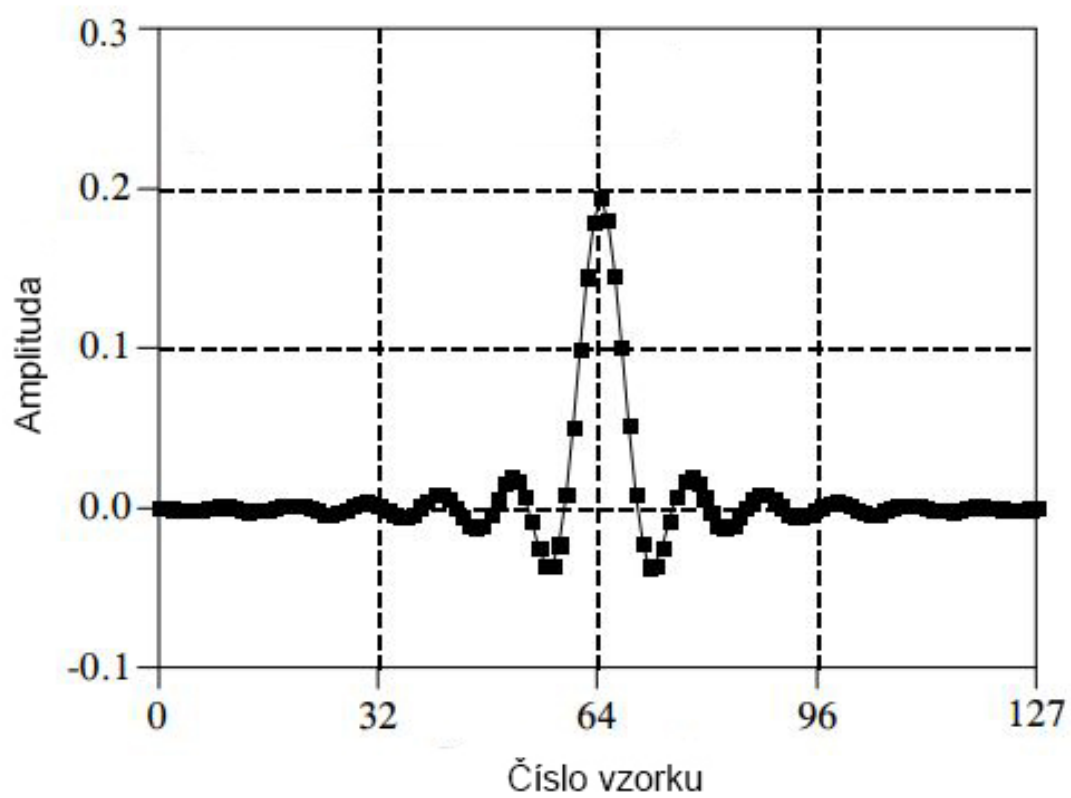


Obr. 2.2: Skoková charakteristika digitálního filtru

důležitá pro aplikace v časové oblasti a obsahuje dva důležité parametry, kterými jsou zvlnění a strmost náběžné hrany charakteristiky. Strmost se udává jako počet vzorků mezi 10 % a 90 % celkové změny signálu. Zvlnění je filtrem generované zkreslení, které se zobrazuje v místě skoku signálu. Toto zkreslení by mělo být co nejmenší, ideálně naprosto eliminováno. V opačném případě nelze po filtraci zjistit, zda je signál zkreslen systémem, který ho generuje, nebo filtrem.

Frekvenční charakteristika je zejména důležitá pro aplikace ve frekvenční oblasti. Na obrázku 2.1 lze vidět čtyři základní frekvenční charakteristiky digitálních filtrů. Účelem těchto filtrů je určité frekvence propustit, zatímco jiné frekvence budou potlačeny. „Propustné pásmo“ zobrazuje, které frekvence filtrem projdou, zatímco „nepropustné pásmo“ obsahuje frekvence potlačené. „Přechodové pásmo“ je mezi těmito pásmy a zobrazuje nedokonalost přechodu filtru z jednoho pásma do druhého.

Impulsní charakteristika je třetí neméně důležitou charakteristikou. Tato charakteristika, která je k vidění na obrázku 2.3 je výstup filtru po obdržení Diracova impulsu, neboli delta funkce. Tato funkce je signál s nulovou hodnotou, kromě jednoho vzorku. [9]



Obr. 2.3: Impulsní charakteristika digitálního filtru

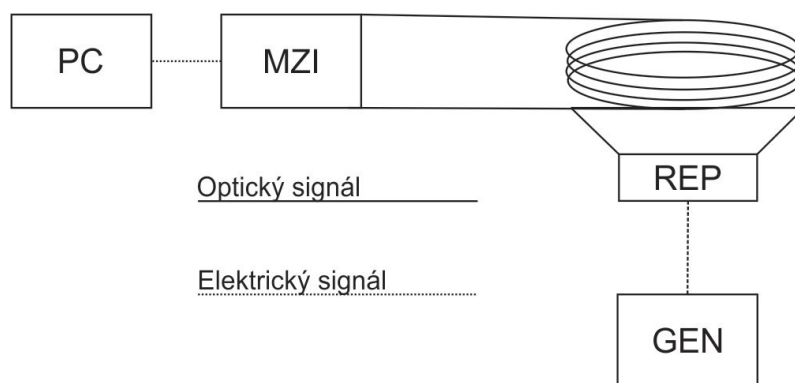
3 MĚŘENÍ VIBRACÍ POMOCÍ MACHOVA - ZEHNDEROVA INTERFEROMETRU

Popis funkce Machova - Zehnderova interferometru byl zmíněn v kapitole 1.2.3. Měření probíhalo v laboratoři SC5.52, Technická 12, na FEKT VUT Brno.

3.1 Blokové schéma

Blokové schéma zapojení měřicího soustrojí je zobrazeno na obrázku 3.1.

- PC - V tomto případě se jedná o jakýkoli počítač s nainstalovaným programem „WaveForms“¹, pracující jako osciloskop.
- MZI - Školní přípravek s interferometrem s dvěma optickými vstupy a výstupem do sběrnice USB. Přípravek lze vidět na obrázku 3.2.
- REP - Reprodukční s připevněným optickým kabelem, generující vibrace, zobrazený na obrázku 3.3.
- GEN - Pro generování signálu byl využit funkční generátor ESCORT EGC - 3235A, umožňující změnu frekvence a amplitudy signálu. Obrázek 3.4.

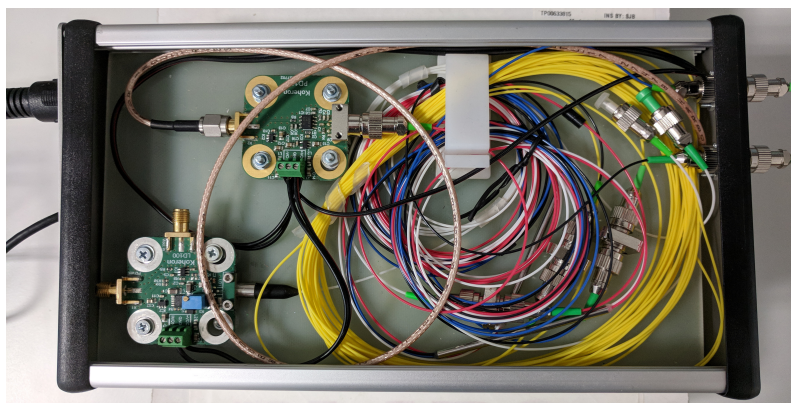


Obr. 3.1: Blokové schéma měření vibrací pomocí Machova - Zehnderova interferometru

3.2 Rozbor měření

U samotného experimentálního měření bylo naměřeno velké množství náměrů s rozdílnými frekvencemi, amplitudami a vzorkovány na různých rozmezích časové základny osciloskopu. Tyto tři proměnné jsou velmi důležité, aby výsledky měření byly co nejuspokojivější. Navíc bylo u měření potřeba udržet maximální klid nejen

¹Program je zdarma ke stažení na adrese <https://analogdiscovery.com/download/>



Obr. 3.2: Školní přípravek s interferometrem



Obr. 3.3: Reproduktor s připevněným optickým kabelem

u měřícího ústrojí, ale i v celém širším okolí, jelikož citlivost vláknových senzorů je velmi vysoká. Z naměřených vzorků byly vybrány 4 a to s frekvencemi 1 Hz, 10 Hz, 300 Hz a 3000 Hz. U reproduktoru byl zjištěn jev, kdy velmi signifikantní frekvence byly jednotkovým násobkem frekvence generované. Tento jev vzniká samotným rozvibrováním reproduktoru a bylo s ním nadále počítáno.

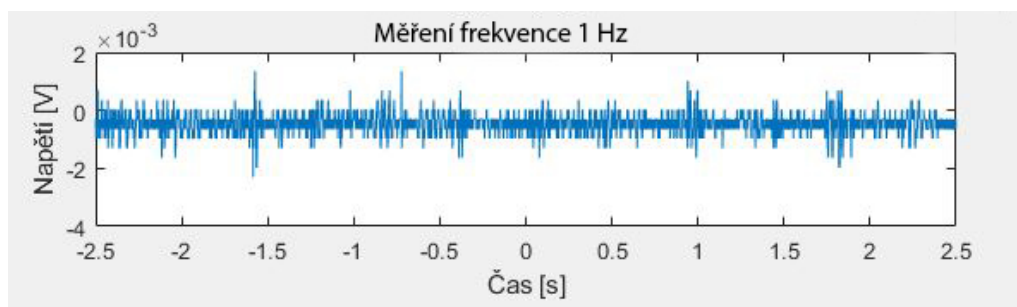
3.2.1 Měření frekvence 1 Hz

U měření takto nízkých frekvencí nastává celá řada problémů. Prvním z nich je nutnost použití dlouhé časové základny buď 500 ms/dílek, nebo 1 s/dílek z důvodu zachycení signálu na osciloskop, který zpravidla má na obrazovce dílků 10. K tomuto problému se navazuje další a to potřeba udržet v okolí 5 s, respektive 10 s naprostý



Obr. 3.4: Funkční generátor signálu

klid. Jelikož u tohoto měření je potřebná vysoká citlivost, tak i rušení jako je posun židle, tichý hovor, či otáčení listu papíru se vyznačují jako velmi rušivé prvky. Po potlačení všech těchto rušivých zdrojů, se stále bohužel nedal potlačit zvuk samotného generátoru, či membrány reproduktoru, lepící pásky a posunu vlákna po reproduktoru. I přes použití maximální amplitudy, jakou generátor byl schopen generovat, nebyl odstup signálu od šumu natolik výrazný, aby se v signálu frekvence 1 Hz výrazně projevila. To lze vidět na obrázku 3.5 ².



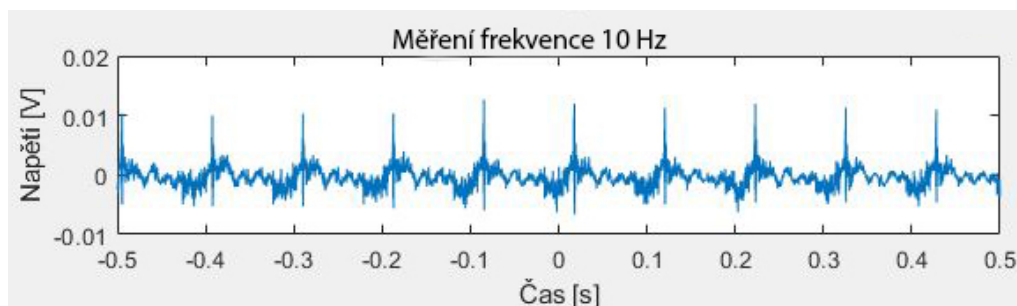
Obr. 3.5: Graf: Měření frekvence 1 Hz

3.2.2 Měření frekvence 10 Hz

Frekvence 10 Hz byla první nejnižší frekvencí, která byla v signálu detekována. Na obrázku 3.6, lze vidět špičky odpovídající této frekvenci. Tyto význačné špičky jsou tvořeny silným nárazem vlákna o reproduktor. Tento náraz byl vytvořen díky vysoké amplitudě generovaného signálu, který v reproduktoru vytvoří značný pohyb membrány. Vláknem při pohybu membrány setrvačností zůstává zlomek času na svém místě a při zpětném pádu opět naráží do membrány. Tomuto jevu nebylo možno

²K vykreslování grafů byla využita aplikace popisovaná v kapitole 4.1

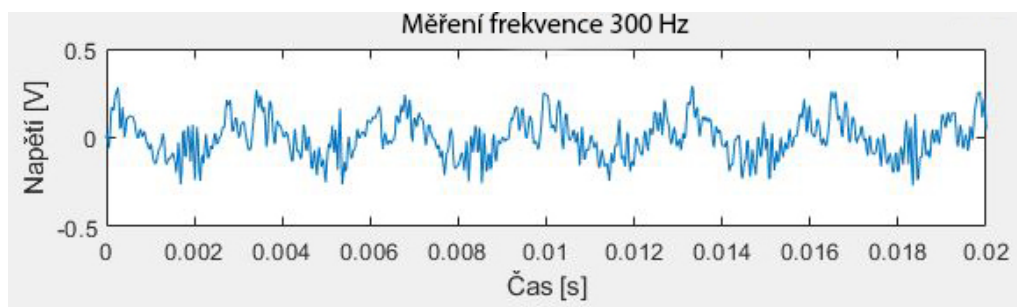
zabránit ani fixováním vlákna lepicí páskou. Tento jev výhodně zvyšoval odstup signálu od okolního šumu.



Obr. 3.6: Graf: Měření frekvence 10 Hz

3.2.3 Měření frekvence 300 Hz

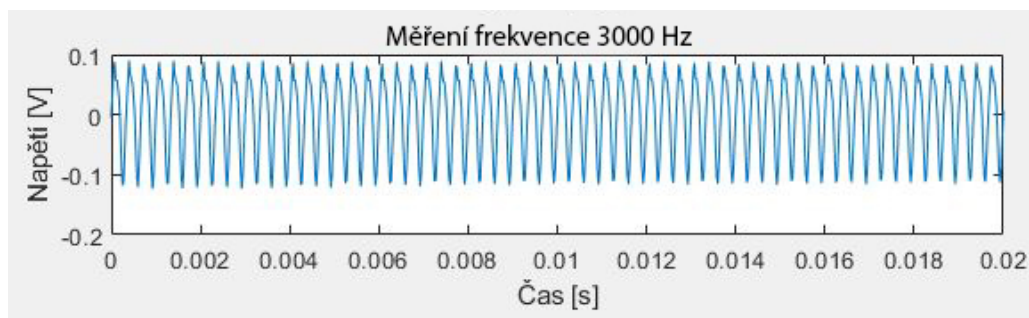
U měření frekvence 300 Hz, se již začínala projevovat samotná energie frekvence. I přes značný šum, který lze vidět na obrázku 3.7 se samotná frekvence dá od šumu jednoduše odlišit. V tomto případě nebyla potřeba maximální hodnota amplitudy z generátoru signálu.



Obr. 3.7: Graf: Měření frekvence 300 Hz

3.2.4 Měření frekvence 3000 Hz

Jak je patrné z obrázku 3.8, frekvence signálu je již tak vysoká, že samotný šum se již v signálu téměř neprojevuje. Výrazné hlukové projevy samozřejmě narušovaly průběh měření i u této frekvence, nicméně bylo mnohem jednodušší zachytit nezarušený segment signálu u velmi krátké časové základny. Nebylo potřeba využít ani polovinu z rozmezí nastavení amplitudy na generátoru, což bylo ze sluchového hlediska přijatelné.



Obr. 3.8: Graf: Měření frekvence 3000 Hz

3.3 Zhodnocení měření

Měření optického vlákna pomocí interferometru je bez debat jedním z nejcitlivějších měření, které lze provést. Kupříkladu měření gravitačních vln, jako nejpřesnější měření, které kdy proběhlo, bylo také provedeno na obrovském interferometru podobném interferometru Michelsonovu. Z těchto důvodů citlivosti, je u měření potřeba naprostý klid v odhlučněném prostředí. Pokud ale plánujeme měření provést a využít v normálním prostředí, třeba k měření seismických vln, které odpovídají jednotkám Hz, šumu se zcela jistě není možné vyhnout. V tomto případě je potřeba ve fázi zpracování signálu vytvořit pokročilou filtraci. Se stoupající frekvencí signálu bylo zjištěno, že odstup signálu od šumu byl čím dál vyšší, proto bylo od měření frekvencí vyšších než 3000 Hz upuštěno. Výsledky takových měření by byly s jistotou stále více uspokojivější.

Pro potřeby práce bylo vytvořeno daleko větší množství náměrů, které nejsou v tomto rozboru popisovány, vybrány byly frekvence na kterých se dá nejlépe demonstrovat elementy mající vliv na měření. V průběhu tvorby práce byly naměřeny náměry, které lze najít v příloze v adresářích „MZI_8000vz_1ch“ a „MZI_16000vz_2ch“. Ostatní náměry byly vytvořeny studenty, kteří měřili v rámci svých závěrečných prací. Tímto bych jim rád poděkoval, jelikož díky jejich měření bylo možné se plně věnovat aplikaci popisované v další části práce.

3.4 Měření šumového pozadí

U měření šumu byly využity stejné přístroje jako u měření v kapitole 3.2. Měření šumu je velmi náročná záležitost z hlediska udržení klidu. Jelikož šum okolí se prakticky neustále mění, nejideálnějším řešením této situace by bylo při měření vibrací využít druhé rameno duálního Machova - Zehnderova interferometru, které by v dostatečné vzdálenosti od zdroje vibrací snímalo okolní šum. Nevýhodou tohoto měření by ale stále díky citlivosti senzoru bylo zakomponování do okolního šumu i vzdálené

vibrace, které by v následném zpracování signálu ochuzovaly zkoumaný signál o důležité prvky. Bohužel nebylo možné tuto možnost vyzkoušet. Pro měření byl tedy zvolen klasický Machův - Zehnderův interferometr, se kterým byly střídavě měřeny vibrace na reproduktoru, jak popisuje předešlá kapitola, a následně okolní šum.

Měření šumu probíhalo v několika fázích, jelikož bylo zjištěno, že generátor signálu budící reproduktor generuje nezanedbatelný hluk a vibrace do okolí. Proto v příloze lze vidět soubor měření se zapnutým generátorem a bez. Další fází měření bylo nastavení časové základny osciloskopu na hodnoty postupně 10 ms, 20 ms a 50 ms, přičemž u každé bylo naměřeno dohromady pět vzorků okolního šumu. Výsledky takového typu měření je velmi těžké hodnotit, z tohoto důvodu bylo přistoupeno k naměření velkého množství hodnot, které byly následně testovány a vybírány nejideálnější z nich.

4 APLIKACE PRO ANALÝZU SIGNÁLŮ Z VLÁKNOVÝCH SENZORŮ

V této kapitole se práce zabývá návrhem, popisem a tvorbou aplikace analyzující signál z distribuovaných vláknových senzorů ve vývojovém prostředí Matlab.

4.1 Aplikace pro analýzu signálu z vibračních senzorů

Aplikace je vytvořena v programovacím prostředí Matlab a její grafické uživatelské prostředí v aplikaci GUIDE. Aplikace se zabývá analýzou signálu z vibračních senzorů. Mezi senzory, které poskytly signály pro odlazování této aplikace patří Machův - Zehnderův interferometr, Duální Machův - Zehnderův interferometr, Michelsonův interferometr a Nebalancovaný Michelsonův interferometr. Aplikace se stále nachází ve verzi nevyhovující pro veřejné sdílení, jelikož neproběhly systémové a akceptační testy. Pro přehled a orientaci ve výpisech ze zdrojového kódu jsou v tabulkách 4.1 a 4.2 detailně popsány všechny proměnné a prvky.

Základní uživatelské prostředí lze vidět na obrázku 4.1. Na tomto obrázku je aplikace v základním režimu, který se zobrazí ihned po startu. Dalším režimem je režim pro filtrování, který lze vidět na obrázku 4.7. Posledním režimem je redukce šumu pomocí šumového pozadí, k vidění je na obrázku 4.8. Z obrázků lze vidět, že horní část se vstupy (A a D) zůstává stejná, pouze se přepíná tělo aplikace.

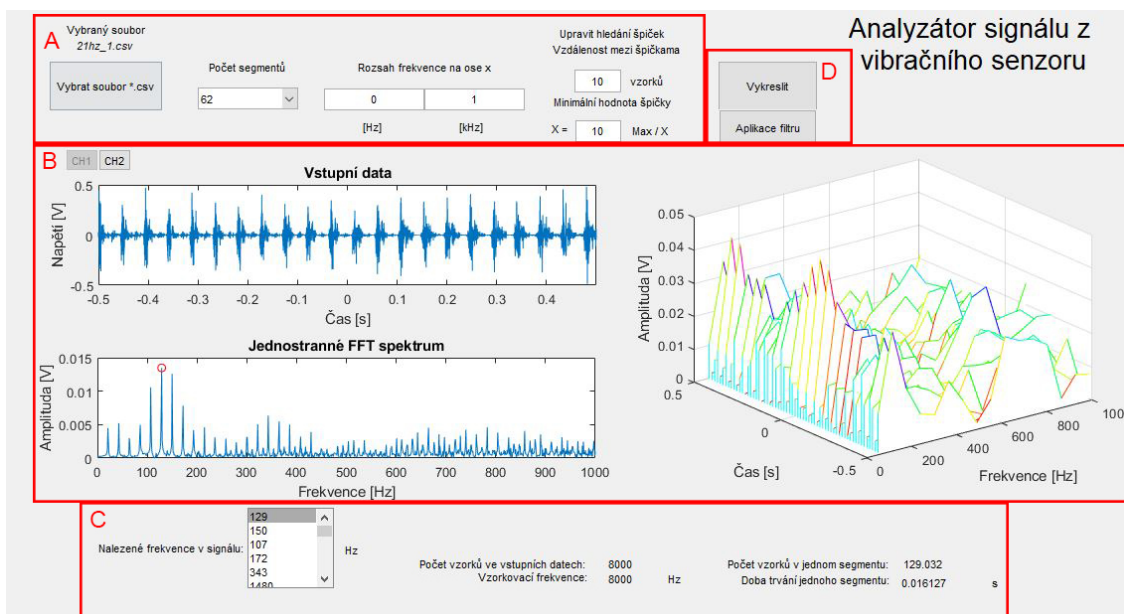
4.1.1 Základní režim

V této části bude popsána aplikace v základním režimu, vstupy, výstupy a další části jak jsou k vidění na obrázku 4.1. Písmenné označení následujících odstavců odpovídá označení na obrázku odkazovaném výše.

A - Vstupy aplikace

Vstupy aplikace se nacházejí v horní části GUI. Tyto vstupy jsou ošetřeny systémem, kdy není možné zadávat další parametry, dokud není správně zadán parametr zadávaný. Uživatel je o této skutečnosti upozorňen chybovou hláškou, obsahující druh chyby, jaké se zadavatel dopustil. Toto lze vidět například na obrázku 4.3.

Prvním vstupem při postupu zleva doprava je tlačítko pro výběr souboru ve formátu *.csv. Tento formát je zvolen, jelikož drtivá většina osciloskopů a virtuálních osciloskopů běžících na PC jsou schopny do tohoto formátu svůj výstup exportovat. V následujícím kódu lze vypořádat, že nahrávání dat začíná až od druhého řádku



Obr. 4.1: Uživatelské prostředí aplikace - základní režim

souboru. Toto bylo zvoleno z důvodu, že 100 % náměrů mělo v prvních dvou řádcích název a číslo kanálu. Dále je potřeba, aby v prvním sloupci byly časové hodnoty a ve sloupcích dalších hodnoty napětí, nebo dalších měřených veličin. V dalších verzích se bude pracovat na zobecnění tohoto vstupu. Dále kód operuje s prvkem „text2“, který vypíše nad tlačítko název souboru, který byl zvolen.

Výpis 4.1: Nahrání souboru *.csv

```
[FileName, PathName] = uigetfile('*.csv');
completePath = strcat(PathName, FileName);
namer = csvread(completePath, 2, 0);
set(handles.text2, 'String', FileName);
```

Dalším vstupem je „počet segmentů“. Výběr segmentů je důležitým vstupem pro „Waterfall graf“ v části 4.1.1, kde je detailně popsán. Vektor „i_seg_str“, který v následujícím výpisu kódu manipuluje s prvkem „popupmenu1“, je naplněn textovými ekvivalenty hodnot, vypočtených z délky náměru.

Výpis 4.2: Nastavení popupmenu1

```
set(handles.popupmenu1, 'string', i_seg_str);
```

Vstupy pod nápisem „Rozsah frekvence na ose x“ jsou tvořeny dvěma editovatelnými boxy, kde se zadává číselná hodnota počáteční a konečné frekvence na ose x, na grafech v B. Do prvního z boxů se zadává frekvence v Hz, kdežto pro

zjednodušení zadávání je v druhém boxu přijímána hodnota v kHz. Pro menší hodnoty je potřeba z důvodů syntaxe v editoru Matlab využívat desetinnou tečku. Tyto vstupy jsou ošetřeny proti chybám jako jsou zadání písmen, či zadání menší konečné frekvence než počáteční, nebo zadání čísel záporných. U každé z těchto chyb je zablokováno další zadávání a chybová hláška upozorní zadavatele o chybě. Ukázky správně a špatně zadaných parametrů lze vidět na obrázcích 4.2 a 4.3. Následující kód zobrazuje jako ukázkou jakým způsobem jsou všechny textové vstupy ošetřeny.

Výpis 4.3: Ukázka ošetření vstupu edit1

```
minf = str2double (minf);
if((~isinteger(minf)) && (minf >= 0.0))
    set(handles.text10, 'String', []);
    set(handles.edit2, 'enable','on');
else
    set(handles.text10, 'String', 'Zadejte kladné číslo!');
    set(handles.edit2, 'enable','off');
end
```

The screenshot shows a MATLAB GUI with the following elements:

- Vybraný soubor:** 300hz_1.csv
- Vybrat soubor *.csv:** A button to select a file.
- Počet segmentů:** A dropdown menu currently showing '32'.
- Rozsah frekvence na ose x:** Two input fields. The first field (labeled [Hz]) contains the value '1'. The second field (labeled [kHz]) contains the text 'Do'.

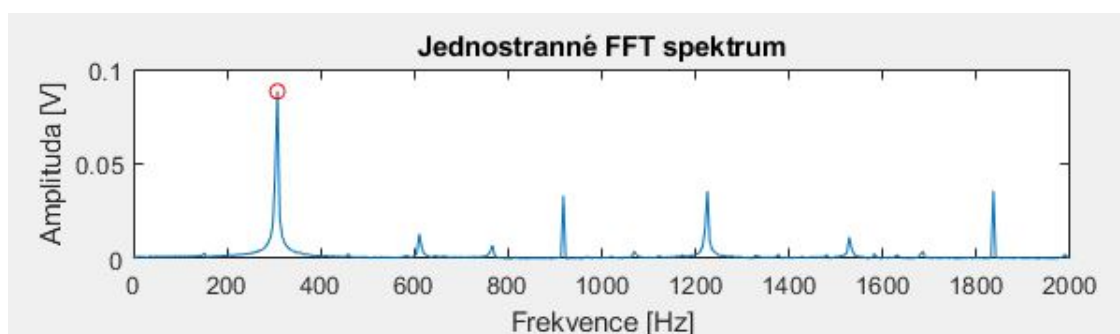
Obr. 4.2: Ukázka správného zadání parametrů

The screenshot shows the same MATLAB GUI as in Figure 4.2, but with an error state:

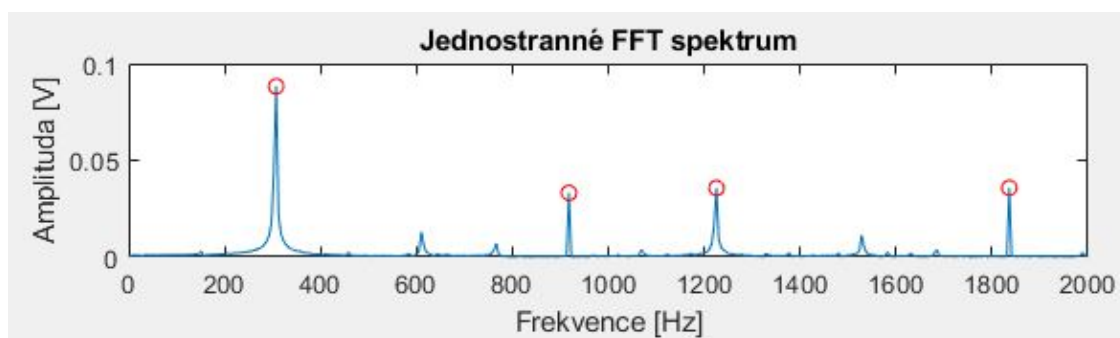
- Vybraný soubor:** 300hz_1.csv
- Vybrat soubor *.csv:** A button to select a file.
- Počet segmentů:** A dropdown menu currently showing '32'.
- Rozsah frekvence na ose x:** Two input fields. The first field (labeled [Hz]) contains the value '-5'. The second field (labeled [kHz]) contains the text 'Do'.
- Error Message:** A red text label 'Zadejte kladné číslo!' (Enter a positive number!) is displayed at the top of the GUI.

Obr. 4.3: Ukázka chybové hlášky u špatně zadaných parametrů

Posledními vstupy jsou opět dva editovatelné boxy, úpravou kterých je ovlivněna činnost grafu „Jednostranné FFT spektrum“ v B a tabulky frekvencí v C. Tyto vstupy jsou opět ošetřeny proti špatnému zadání, ale z pohledu jejich funkce se využívají až k další analytické činnosti, po vykreslení grafů. První ze vstupů upravuje vzdálenost mezi nejbližšími dvěma vypsanými špičkami v FFT spektru. Druhý vstup po zadání koeficientu „X“ vypíše do tabulky pouze špičky, které hodnotou vyhovují poměru maximální hodnoty špičky ku „X“. Z obrázků 4.4 a 4.5, lze vidět, že po změně koeficientu jsou v grafu vyhledávány špičky s minimálně poloviční hodnotou maximální špičky, po změně koeficientu na 4, aplikace vyhledá špičky s minimálně čtvrtinovou velikostí.



Obr. 4.4: Hledání špiček s koeficientem hledání 2



Obr. 4.5: Hledání špiček s koeficientem hledání 4

B - Grafické výstupy

Tato část aplikace zobrazuje grafické výstupy. Prvním grafem jsou „Vstupní data“, která zobrazují data z vybraného souboru pomocí tlačítka v A. Tento soubor může obsahovat oba kanály osciloskopu. Pokud tomu tak je, jsou nad grafem dva tlačítka

s označením „CH1“ a „CH2“, která logicky přepínají mezi jednotlivými kanály. Graf zobrazuje data z interferometru v závislosti na čase. Na tyto data je poté aplikována rychlá Fourierová transformace a data jsou převedena z časové oblasti, do oblasti frekvenční, čímž získáme graf „Jednostranné FFT spektrum“ zobrazující jednotlivé zastoupení frekvenčních složek v signálu. Tento graf, respektive data z tohoto grafu již úzce spolupracují se vstupy „Upravit hledání špiček“ a „Rozsah frekvence na ose x“ v A. Zde již jde vizuálně posoudit, které špičky nejsou důležité a úpravou daného vstupu je eliminovat, zároveň druhým párem vstupů zkoumat kusy spektra, která spadají do centra našeho zájmu.

Posledním a nejvýraznějším grafem je „Waterfall graf“, který zobrazuje amplitudu vibrací jak v závislosti na čase, tak na frekvenci. Tento graf tedy zobrazuje fluktuaci signifikantních vibrací v závislosti na čase. Vlastnosti tohoto grafu jsou úzce provázány se vstupem „Počet segmentů“ a „Rozsah frekvence na ose x“, oba popsány v A. Počtem segmentů se myslí rozdělení celých dat do různého počtu segmentů a následným aplikováním rychle Fourierovy transformace na každý z nich. Výběr v tomto menu se výrazně liší dle počtu vzorků v datovém vektoru. Při analyzování tohoto grafu je potřeba nalézt kompromis mezi přesností v čase a přesností určení frekvence, aby graf byl dobře čitelný. Kupříkladu při zadání počtu segmentů: „1“ se nám zobrazí graf „Jednostranné FFT spektrum“, čímž docílíme maximální frekvenční přesnosti, ale nulové přesnosti v čase. Analogicky při maximálním možném počtu segmentů bude graf maximálně přesný v časové oblasti a extrémně nepřesný v oblasti frekvenční. Rozsahem frekvence na ose x opět upravíme graf podle naší potřeby k docílení viditelnosti pouze určitého kusu grafu. V této části byly využity dva druhy grafů. Jednak klasický graf zobrazující dvě na sobě závislé veličiny, druhak třídimenzionální graf. Rozdíl v jejich implementaci je nastíněn v následujícím kódu.

Výpis 4.4: Implementace různých druhů grafů

```
%Graf vstupních dat
axes(handles.axes1);
plot(time,values);
xlim([tmi tmx]);
title('Vstupní_data');
xlabel('Čas [s]');
ylabel('Napětí [V]');

%Waterfall graf
axes(handles.axes3);
colormap(hsv(128));
```

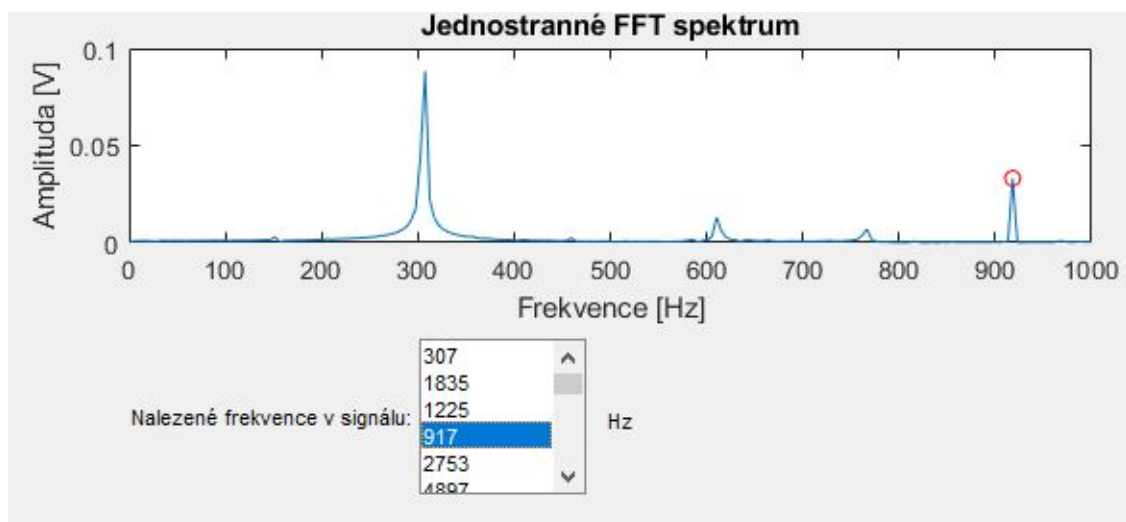


```

set(gcf,'renderer','openGL');
waterfall(freq_p,time_a,store_p);
xlim([minf maxf]);
xlabel('Frekvence [Hz]');
ylabel('Čas [s]');
zlabel('Amplituda [V]');

```

C - Textové výstupy



Obr. 4.6: Vybrání a zobrazení frekvence v grafu

Nejvíce signifikantním textovým výstupem je tabulka „Nalezené frekvence v signálu“, která je svázaná s dvěma prvky. Prvním z nich je graf „Jednostranné FFT spektrum“ v B a druhým je úprava hledání špiček v A. Tato tabulka je naplněna špičkami nalezenými v datech po rychlé Fourierově transformaci. Množství a druh špiček lze upravovat pomocí výše zmíněných vstupů. Po vykreslení grafu jsou všechny frekvence označeny v grafu červenými značkami, následným označením samotné frekvence v tabulce, se na grafu zobrazí o kterou špičku se jedná. Tento jev lze vidět na obrázku 4.6. Ve výpisu z kódu lze vidět jakým způsobem se špičky hledají a následně vykreslují.

Výpis 4.5: Hledání a vykreslování špiček

```

%Hledání špiček
max_P1 = max(P1);
[pks, lcs] = findpeaks(P1,'MinPeakDistance',mezi_vzorky,
'SortStr','descend','MinPeakHeight',max_P1/vel_vzorku);

```

```

topfs = f(lcs);
topfs = fix(topfs);

%Vykreslení do grafu a výpis do tabulky
axes(handles.axes2);
plot(f,P1,f(lcs),pks,'or');
xlim([minf maxf]);
title('Jednostranné FFT spektrum');
xlabel('Frekvence [Hz]');
ylabel('Amplituda [V]');
set(handles.listbox2, 'String', topfs);

```

Další pár textových výstupů obsahuje informace o vstupních datech. Prvním z nich je „Počet vzorků ve vstupních datech“. Tato informace je důležitá z hlediska pochopení kvality výstupních veličin, jejichž kvalita je přímo úměrná počtu vzorků ve vstupním signálu. Na tento parametr je nejcitlivější zejména Waterfall graf, který vzorky následně segmentuje. Druhým výstupem je vzorkovací frekvence, řídící se stejným pravidlem. Čím vyšší vzorkovací frekvence, tím kvalitnější data. V následujícím úryvku z kódu lze vidět získání těchto parametrů a nastavení daných textových polí.

Výpis 4.6: Získání informací o náměru

```

%Hledání délky vektoru
L = length(values);
set(handles.text34, 'String', L);
%Hledání vzorkovací frekvence
period = time(2)-time(1);
Fs = 1/period;
set(handles.text37, 'String', Fs);

```

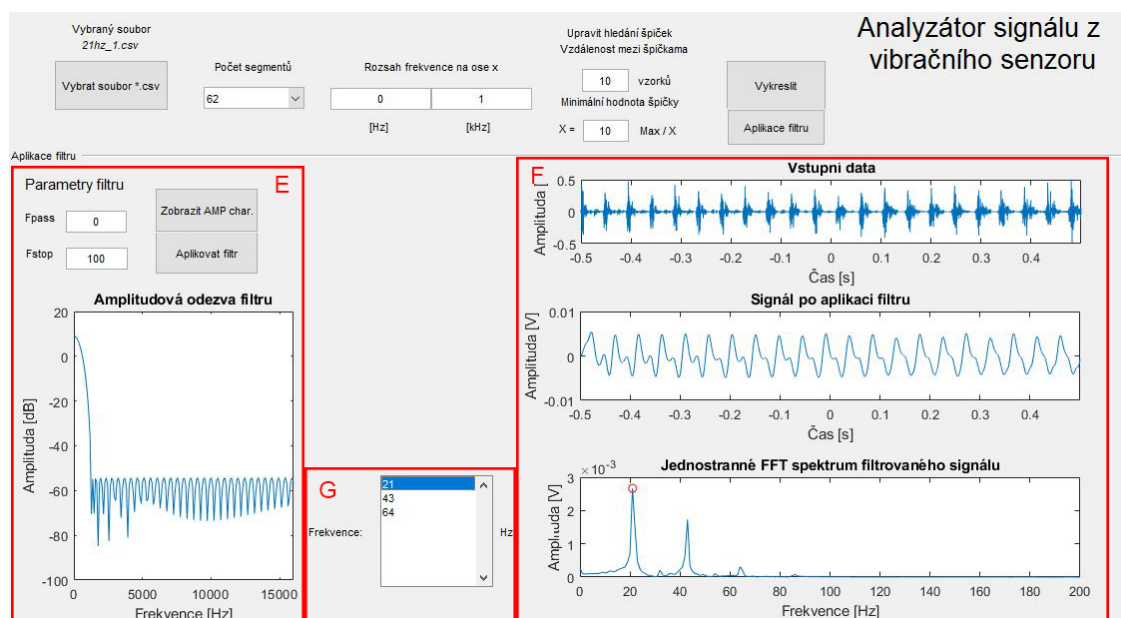
Poslední pár textových výstupů se vztahuje k Waterfall grafu. První sděluje kolik vzorků z původního signálu je nyní v jednom segmentu. Druhý výstup popisuje časové trvání jednoho segmentu. Tyto výstupy doplňují informace o momentálním grafu a ucelují jeho chápání.

D - Ovládací tlačítka

Poslední část aplikace z obrázku 4.1 obsahuje tlačítka kritická pro fungování celé aplikace. Tlačítko „Vykreslit“ po zadání všech parametrů provede všechny výpočty potřebné pro vykreslování grafů a vypsání textových výstupů. Po každé změně

vstupních parametrů z A je potřeba toto tlačítko zmáčknout a tím vyvolat všechny potřebné změny.

4.1.2 Režim s designem filtru



Obr. 4.7: Uživatelské prostředí aplikace - režim s designem filtru

Tento režim aplikace byl vytvořen za účelem další analýzy vstupního signálu. V tomto režimu je signál podstoupen filtraci, určenou uživatelem. Designovat jde buď filtr typu dolní propust, nebo pásmová propust. S filtrem typu horní propust se v této verzi nepočítá, jelikož nemá v tomto typu aplikace praktické využití, filtruje se většinou vysokofrekvenční šum. Grafické prostředí lze vidět na obrázku 4.7 a bude dále popsáno pomocí ekvivalentního písmenného označení v obrázku a následujícím textu.

E - Design filtru

Jak již bylo dříve zmíněno horní část aplikace se vstupy zůstává nezměněna, tím se tedy dostáváme k nastavení parametrů a samotnému designování filtru. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.5 mezi základní parametry patří frekvence propustného pásma („Fpass“), frekvence nepropustného pásma („Fstop“), zvlnění a strmost náběžné hrany. Pro design v aplikaci jsou důležité první dva parametry, definující charakteristiku filtru, zbylé dva parametry jsou vypočteny tak, aby byly co nejideálnější.

Tyto výpočty lze vidět v následující ukázce ze zdrojového kódu. Po zadání parametrů a stisknutí tlačítka „Zobrazit AMP char.“ je vygenerován graf „Amplitudová odezva filtru“. V této chvíli ještě není filtr aplikován na data a je možnost ho upravit, či znovu designovat.

Výpis 4.7: Výpočty v designu filtru

```
%Výpočet řádu filtru s pomocí vstupních parametrů
[N, Fo, Ao, W] = firpmord([Fpass, Fstop]/(Fs/2), [1 0],
[Dpass, Dstop]);
```

```
%Výpočet koeficientů filtru
b = firpm(N, Fo, Ao, W, {dens});
```

Pokud se filtr jeví jako vyhovující, tlačítko „Aplikovat filtr“ aplikuje koeficienty filtru na vstupní data.

F - Grafické výstupy

V grafických výstupech v režimu s filtry je již známý prvek, kterým je graf se vstupními daty. Je zde vykreslen pro srovnání s následujícím grafem, který zobrazuje vstupní data po aplikaci filtru. Tento graf je vykreslen po zmáčknutí tlačítka „Aplikovat filtr“ v E. Po zmáčknutí je vykonán kód v následujícím výpisu, který na vstupní data aplikuje filtr a následně vyfiltrovaná data vykreslí do grafu.

Výpis 4.8: Aplikace filtru a následné vykreslení grafu

```
%Aplikace filtru
values_f = filter (b,1,values);

%Vykreslení grafu
axes(handles.axes5);
plot(time,values_f);
xlim([tmi tmx]);
title('Signál po aplikaci filtru');
xlabel('Čas [s]');
ylabel('Amplituda [V]');
```

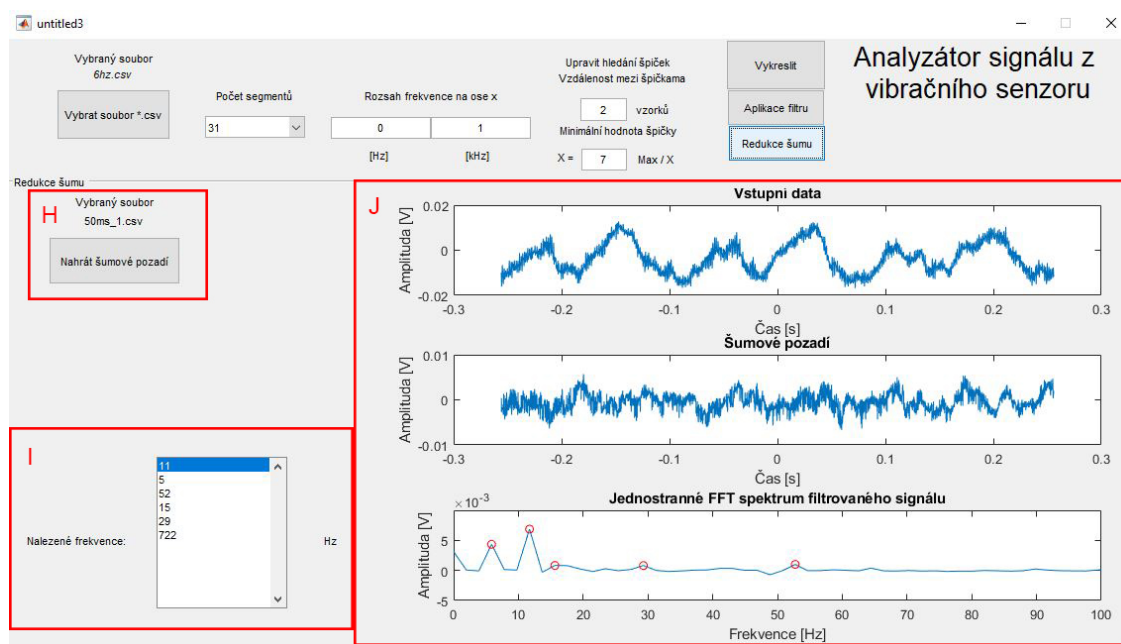
Mimo tento kus kódu je opětovně vykonán i kód, který již byl popsán v části B. Jedná se o vytvoření grafu „Jednostranné FFT spektrum filtrovaného signálu“, na kterém se opět zobrazují signifikantní špičky. Nicméně zde již není díky filtraci potřeba upravování hledání špiček, jelikož jejich počet je silně redukován.

G - Textové výstupy

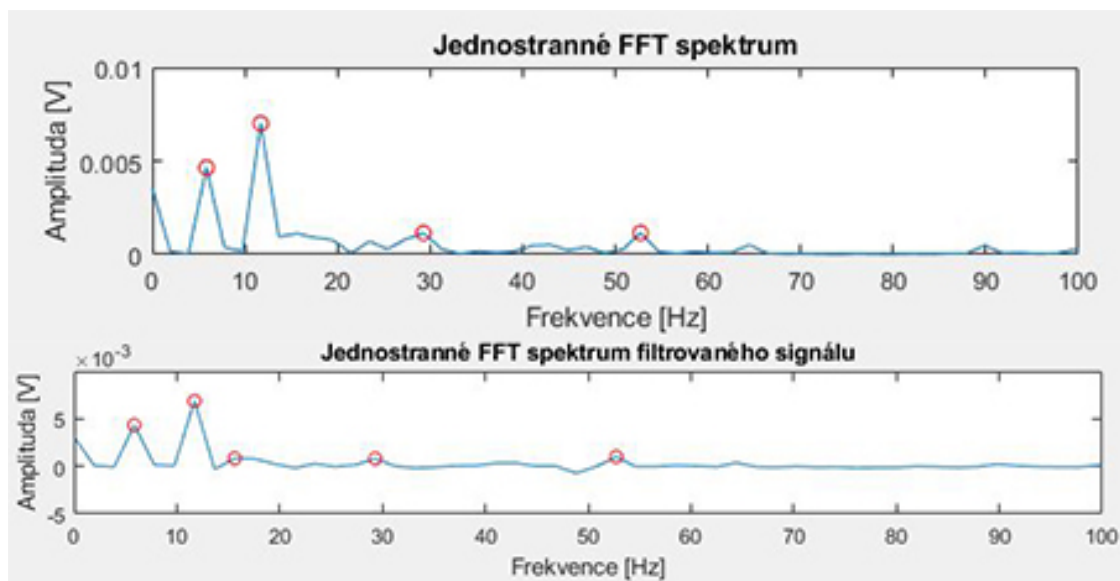
K předchozímu odstavci se samozřejmě opět váže i textový výstup ve formě tabulky s výpisem všech nalezených špiček. Opětovně, tabulka funguje stejným způsobem jako v části C. Tedy po označení špičky v tabulce je zobrazena na grafu v F.

4.1.3 Režim redukce šumu

Tento režim pomocí náměrů z kapitoly 3.4 redukuje šumové pozadí v užitečném signálu. V této části byly testovány celkem tři metody. První metodou bylo využití LMS filtru, druhou bylo odstranění šumu v časové oblasti a třetí odstranění v oblasti frekvenční. Po množství testů se jako nejefektivnější metoda osvědčila jedna z jednodušších a tou je odstranění šumu ve frekvenční oblasti. Ve zdrojovém kódu nicméně stále jsou v komentářích obsaženy zbylé dvě metody, které se nevyužívají. Na obrázku 4.9 lze na signálu vidět vyfiltrování vyšších frekvencí objevujících se v pozadí. V tomto případě byla měřená frekvence vibrací 6 Hz, přesto aplikace uvádí jako nejsignifikantnější frekvenci 11 Hz. Tento jev už byl dříve probírán a je způsoben druhotnými odrazy v reproduktoru, frekvence 11 Hz je tedy určena správně.



Obr. 4.8: Uživatelské prostředí aplikace - režim redukce šumu



Obr. 4.9: Srovnání signálu před a po redukci šumu

H - Tlačítko pro nahrání šumu

Toto tlačítko se v mnohém velmi podobá tlačítku popsanému v části A. Rozdílem je, že uživatel by měl pro získání relevantního výstupu nahrát změřený šum pozadí, který má k dispozici. Opět je možné nahrát pouze soubory ve formátu *.csv, ovšem nepočítá se zde s dalšími kanály.

I - Textový výstup

Tento textový výstup je opět tabulkou, která zobrazuje signifikantní frekvence v grafu po aplikování redukce šumu. Má vestavěnou stejnou funkci, jako tabulky v ostatních režimech, po kliknutí na frekvenci se daná frekvence zobrazí v grafu.

J - Grafické výstupy

Posledním výstupem tohoto režimu jsou grafická znázornění jednotlivých vstupů, tedy vstupní data nahrána na počátku v A a data šumového pozadí nahraného pomocí tlačítka „Nahrát šumové pozadí“. Třetí a nejdůležitější graf zobrazuje jednostranné FFT spektrum signálu po aplikaci redukce. Tento graf je opět svázán s tabulkou, která zobrazuje, které frekvence jsou nyní v signálu obsaženy.

4.1.4 Legenda prvků a proměnných ve zdrojovém kódu

Zdrojový kód v příloze je strukturalizován a okomentován, v tabulce 4.1 a 4.2 je pro přehled předchozích výpisů vypsána legenda důležitých prvků a proměnných ve zdrojovém kódu. Proměnné jsou pro přehled seřazeny podle výskytu ve výpisech.

Tab. 4.1: Legenda prvků ve zdrojovém kódu

Prvek	Popis
pushbutton1	Tlačítko pro výběr souboru v *.csv
pushbutton2	Tlačítko pro provedení výpočtů a vykreslení grafů
pushbutton3	Tlačítko pro přepnutí do režimu filtru
pushbutton4	Tlačítko pro aplikování filtru na signál
pushbutton5	Tlačítko pro zobrazení frekvenční charakteristiky filtru
pushbutton6	Tlačítko pro zobrazení prvního kanálu z náměru signálu
pushbutton7	Tlačítko pro zobrazení druhého kanálu z náměru signálu
pushbutton8	Tlačítko pro přepnutí do režimu redukce šumu
pushbutton9	Tlačítko pro nahrání šumového pozadí
edit1	Editbox pro zadání frekvence „od“
edit2	Editbox pro zadání frekvence „do“
edit3	Editbox pro zadání minimální hodnoty mezi špičkama
edit4	Editbox pro zadání hledání minimální hodnoty špičky
edit6	Editbox pro zadání frekvence propustného pásma filtru
edit7	Editbox pro zadání frekvence nepropustného pásma filtru
popupmenu1	Menu pro výběr počtu segmentů
listbox2	Seznam frekvencí v základním režimu
listbox3	Seznam frekvencí v režimu pro filtrování
axis1	Graf „Vstupní data“ v základním režimu
axis2	Graf „Jednostranné FFT spektrum“ v základním režimu
axis3	Graf „Waterfall“ v základním režimu
axis4	Graf „Vstupní data“ v režimu pro filtrování
axis5	Graf „Signál po aplikaci filtru“ v režimu pro filtrování
axis6	Graf „Amplitudová odezva filtru“ v režimu pro filtrování
axis7	Graf „Jednostranné FFT spektrum“ v režimu pro filtrování
text2	Název vybraného souboru
text10	Chybová hláška v základním režimu
text13	Počet vzorků v jednom segmentu
text14	Doba trvání jednoho segmentu
text30	Chybová hláška v režimu pro filtrování
text34	Počet vzorků ve vstupních datech
text37	Vzorkovací frekvence
uipanel2	Panel režimu filtru
uipanel5	Panel režimu redukce šumu

Tab. 4.2: Legenda proměnných ve výpisech zdrojového kódu

Proměnná	Popis
FileName	Obsahuje název nahrávaného souboru
PathName	Obsahuje cestu k nahrávanému souboru
completePath	Obsahuje cestu i s názvem nahrávaného souboru
namer	Matice obsahující časový vektor a jeden, nebo více vektorů napětí
i_seg_str	Vektor naplněn počty segmentů v datovém typu String
minf	Proměnná získaná ze vstupu „edit1“
maxf	Proměnná získaná ze vstupu „edit2“
time	Časový vektor extrahovaný z matice „namer“
values	Napěťový vektor extrahovaný z matice „namer“
tmi	Minimální hodnota času, získaná z vektoru „time“
tmx	Maximální hodnota času, získaná z vektoru „time“
freq_p	Data frekvenční osy ve „Waterfall graf“
time_a	Data časové osy ve „Waterfall graf“
store_p	Data napěťové osy ve „Waterfall graf“
P1	Vektor dat jednostranného FFT spektra
max_P1	Maximální hodnota z vektoru „P1“
pks	Špičky nalezené ve vektoru „P1“
lcs	Pořadí špiček ve vektoru „P1“
mezi_vzorky	Proměnná získaná ze vstupu „edit3“
vel_vzorku	Proměnná získaná ze vstupu „edit4“
f	Vypočtený vektor frekvencí
topfs	Frekvence odpovídající špičkám nalezeným v „P1“
L	Délka vektoru „values“
period	Perioda, vypočtena z časového vektoru
Fs	Vzorkovací frekvence, vypočtena z proměnné „period“
N	Vypočtený řád filtru
Fo	Frekvenční vektor, při výpočtu filtru
Ao	Vypočtena amplitudová odezva filtru
W	Váha filtru
Fpass	Proměnná získaná ze vstupu „edit6“
Fstop	Proměnná získaná ze vstupu „edit7“
Dpass	Zvlnění propustného pásma
Dstop	Útlum nepropustného pásma
b	Koeficienty vytvořeného filtru
values_f	Vektor napětí vyfiltrovaného signálu

5 ZÁVĚR

Po teoretickém popisu, obecném rozdělení různých druhů optických vláknových senzorů a základech digitálního zpracování signálu, tato práce upevňuje základy a znalost funkce distribuovaných senzorů. Práce se zabývá jak senzory založenými na interferometrických metodách, tak na bázi zpětného rozptylu. Ve skupině založené na interferometrických metodách byly rozebrány zejména Michelsonův, Machův - Zehnderův a Sagnacův interferometr. Ve skupině druhé byl kladen důraz na OTDR, polarizační OTDR a fázový OTDR. Poslední dva jmenované se v dnešní době těší velkému zájmu odborníků. Tento zájem byl prozkoumán v další části práce, kde byly vybrány čtyři druhy již sestavených a testovaných distribuovaných vláknových senzorů. Byla hodnocena jejich přesnost, celková cena zapojených přístrojů a možnosti reálného sestavení takového senzoru na VUT v Brně. V následující kapitole je rozebrána problematika měření akustických vibrací pomocí Machova - Zehnderova interferometru. Výstupem ze všech měření nebylo pouze získání signálů pro další použití, které se nacházejí v příloze, ale také důkladnější pochopení procesu snímání tohoto signálu a získat přehled o citlivosti, přesnosti a kvalitě daného přístroje a jakými elementy je možnost tyto parametry ovlivnit. Posledním a neméně důležitým faktorem bylo samotné vizuální a praktické seznámení s celým procesem měření a jednotlivými optickými komponenty. Všechny tyto poznatky byly v průběhu převáděny do tvorby aplikace v prostředí Matlab. Aplikace v momentálním stavu analyzuje vstupní signál již od frekvence 1 Hz, se samozřejmým přihlednutím ke kvalitě signálu. Méně kvalitní zarušené signály lze poté přesněji identifikovat pomocí aplikování digitálních filtrů, nebo, pokud je k dispozici, redukovat šum pomocí náměru šumového pozadí. V době života aplikace nebylo možné z limitujících časových důvodů vystavit aplikaci všem etapám testování, což může znamenat jak vyšší nároky na hardware, tak i nečekané chyby při užívání. V budoucnosti čeká aplikaci přepracování na běh v real-time a režim pro lokaci vibrací pomocí signálu z duálního Machova - Zehnderova interferometru. Po těchto krocích bude aplikace komplexním nástrojem s řadou možností a přístupů k analýze signálů z optovláknových senzorů.

LITERATURA

- [1] BAHRAMPOUR, A.; TOFIGHI, S.; BATHAEE, M.; FARMAN, F. *Optical Fiber Interferometers and Their Applications* [online]. 2012, [cit. 17. 10. 2017]. Dostupné z URL: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs/33221.pdf>>.
- [2] BAO, X.; CHEN, L. *Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors* [online]. 2012, [cit. 13. 10. 2017]. Dostupné z URL: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3444066/>>.
- [3] DUŠEK, M.; MAZANEC, M. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů* [online]. 2012, [cit. 13. 10. 2017]. Dostupné z URL: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf>.
- [4] DVOŘÁK, M. *Optické senzory* [online]. 2014, [cit. 13. 10. 2017]. Dostupné z URL: <http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf>.
- [5] HYNEK, J. *Distribované optické vláknové senzory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 96s Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Münster PhD.
- [6] JUAREZ, M. *Distributed fiber optic intrusion sensor system for monitoring long perimeters* [online]. 2005, [cit. 19. 10. 2017]. Dostupné z URL: <<http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-1702/JUAREZ-DISSERTATION.pdf>>.
- [7] LÁTAL, J.; KOUDELKA, P.; HANÁČEK, F.; ŠIŠKA, P. *Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty* [online]. 2010, [cit. 17. 10. 2017]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2010030001>>.
- [8] LINZE, N.; MEGRET, P.; WUILPART, M. Development of an Intrusion Sensor Based on a Polarization-OTDR System In *IEEE Sensors Journal Vol. 12*, 2012. s. 3005–3009. ISSN 1558-1748.
- [9] QUINNELL, R. *Designing digital filters* [online]. 2003, [cit. 20. 3. 2018]. Dostupné z URL: <https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275863>.
- [10] SMITH, S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, San Diego, California, 1999. ISBN 0-9660176-6-8.

- [11] SMÉKAL, Z. *Číslicové zpracování signálů*, Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4639-7.
- [12] SUN, Q.; LIU, D.; WANG, J.; LIU, H. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer In *Optics Communications*, 2007. s. 1538–1544. ISSN 0030-4018.
- [13] WANG, Y.; JIN, B.; WANG, Y.; WANG, D.; LIU, X.; BAI, Q. Real-Time Distributed Vibration Monitoring System Using Φ -OTDR In *IEEE Sensors Journal*, 2017. s. 1333–1341. ISSN 1558-1748.
- [14] WANG, Y.; XIN, L.; JIN, B.; SONG, X.; WANG, D.; BAI, Q.; WANG, Y.; WANG, A. Optical Fiber Vibration Sensor Using Chaotic Laser In *IEEE Sensors Journal*, 2017 s. 1336–1339. ISSN 1941-0174.
- [15] YANG, Y.; LU, L.; YANG, F.; CHEN, Y. *The fiber optic Sagnac interferometer and its sensing application* [online]. 2015, [cit. 25. 10. 2017]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7336845>>.
- [16] ŽÁČEK, M. *Nelineární charakter optického prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 53s Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Přinosil PhD.
- [17] ZHANG, Z.; BAO, X. Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of Polarization-OTDR system In *Opt. Express vol. 16*, 2008 s. 10240–10247. ISSN 1094-4087.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AOM	Acoustic-Optic Modulator
APD	Avalanche Photodiode
CCW	Counter-Clockwise
C-OTDR	Coherent - OTDR
csv	Comma Separated Values
CW	Clockwise
DAQ	Data Acquisition
DFB	Distributed Feedback
DFT	Discrete Fourier Transform
DSP	Digital Signal Processing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
EDFA	Erbium Dopped Fiber Amplifier
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
FM	Fiber Mirror
FRM	Faraday Rotation Mirror
GUI	Graphical User Interface
IIR	Infinite Impulse Response
LMS	Least Mean Square
MI	Michelson Interferometer
MZI	Mach - Zehnder Interferometer
OI	Optical Isolator
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometry
PC	Polarization Controller
PD	Photo-Detector
POTDR	Polarization-Optical Time-Domain Reflectometry
PZT	Piezoelectric ceramic transducer
RMS	Root Mean Square
VOA	Variable Optical Attenuator

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD

59

A OBSAH PŘÍLOŽENÉHO CD

- testovací_namery
 - dualMZI_600vz_2ch
 - MI_600vz_1ch
 - MZI_600vz_1ch
 - MZI_8000vz_1ch
 - MZI_16000vz_2ch
 - MZI_LD_LED
 - unbalMI_600vz_3ch
- zdrojove_kody
 - untitled3.fig
 - untitled3.m